

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**МЕХАНІКО-МАШИНОБУДІВНИЙ ІНСТИТУТ  
Кафедра технології машинобудування  
(повна назва кафедри)**

«На правах рукопису»  
УДК \_\_\_\_\_

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри  
\_\_\_\_\_ Ю.В. Петраков  
(підпис) (ініціали, прізвище)

“ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2020 р.

## Магістерська дисертація

зі спеціальності (спеціалізації) **8 05050201 технологія машинобудування**  
(код і назва спеціальності)

на тему: «Технологічне забезпечення зміцнення поверхневого шару деталей машин» \_\_\_\_\_

Виконав: студент \_6\_ курсу, групи \_\_МТ-391МП\_\_  
(шифр групи)

Шкляренко Микола Іванович \_\_\_\_\_  
(прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Науковий керівник старший викладач Бецко Юрій Михайлович \_\_\_\_\_  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Консультант \_\_\_\_\_  
(назва розділу) (науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали) (підпис)

Рецензент \_\_\_\_\_  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали) (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Київ – 2020 року

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Інститут/факультет МЕХАНІКО-МАШИНОБУДІВНИЙ ІНСТИТУТ \_\_\_\_  
(повна назва)

Кафедра технології машинобудування \_\_\_\_  
(повна назва)

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною (освітньо-науковою) програмою

Спеціальність (спеціалізація) 131.Прикладна механіка \_\_\_\_  
(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Завідувач кафедри  
\_\_\_\_ Ю.В. Петраков \_\_\_\_  
(підпис) (ініціали, прізвище)  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020\_ р.

**ЗАВДАННЯ**

**на магістерську дисертацію студенту**

Шклярєнко Микола Іванович \_\_\_\_  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації Технологічне забезпечення зміцнення поверхневого шару деталей машин \_\_\_\_  
науковий керівник дисертації Бецко Юрій Михайлович, старший викладач,  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 р. № \_\_\_\_

2. Строк подання студентом дисертації 10 грудня 2020 р. \_\_\_\_

3. Об'єкт дослідження \_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

4. Предмет дослідження (Вихідні дані – для магістерської дисертації за освітньо-професійною програмою) Закономірності формування параметрів якості поверхневого шару на прикладі оброблення деталі «Важіль» \_\_\_\_

5. Перелік завдань, які потрібно розробити \_\_\_\_  
Систематизувати методи оброблення поверхнево-пластичним деформуванням; прокласифікувати існуючі методи з точки зору досягнення ознак якості деталей машин; використовуючи розроблену класифікацію вибрати метод ППД для оброблення даної деталі, спроектувати технологічну операцію оброблення \_\_\_\_

6. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу Класифікація методів ППД, інформація про забезпечення ознак якості різними видами ППД, проектування технологічної операції обробленням ППД

7. Орієнтовний перелік публікацій \_\_\_\_\_

8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

9. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

#### Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1.	Представлення розділу 1.	31.05.2020 р.	
2.	Представлення розділів 2, 3.	20.11.2020 р.	
3.	Представлення роботи до розгляду.	10.12.2020 р.	

Студент

\_\_\_\_\_ (підпис)

Шкляренко М.І. \_\_\_\_\_ (ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації

\_\_\_\_\_ (підпис)

Бецко Ю.М. \_\_\_\_\_ (ініціали, прізвище)

## Реферат

Магістерська атестаційна робота на тему: «Технологічне забезпечення зміцнення поверхневого шару деталей машин».

**Актуальність теми.** Одним із актуальних напрямків підвищення надійності та довговічності машин є отримання заданих властивостей поверхонь деталей на фінішних операціях, в тому числі методами поверхневого зміцнення. Технологічні можливості методів поверхневого пластичного деформування у поєднанні з високою продуктивністю зміцнювальних операцій ставлять його в число найсучасніших і найперспективніших способів зміцнення деталей машин.

Актуальним залишаються дослідження, спрямовані на вдосконалення відомих і розроблення нових високоефективних способів зміцнення деталей машин, які б забезпечували високий рівень їх експлуатаційних властивостей.

**Мета і завдання.** Підвищення експлуатаційних характеристик деталей машин шляхом створення технологічними методами в поверхневих шарах заданих параметрів зміцнення. Для цього необхідно:

1. Установити взаємозв'язок між технологічними параметрами процесу й характеристиками зміцненого шару.
2. Установити вплив ступеня пластичної деформації поверхневого шару на міцність деталей.
3. Визначити рівень залишкових напружень у поверхневих шарах після пластичного деформування.
4. Розрахувати оптимальні технологічні параметри режиму зміцнювального оброблення.

**Об'єкт дослідження.**

Технологія підвищення зносостійкості деталей машин.

**Предмет дослідження.**

Закономірності формування параметрів якості поверхневого шару на прикладі оброблення деталі «Важіль».

**Практичне значення наукових результатів.**

Підвищення експлуатаційних характеристик деталі «Важіль» шляхом пошуку та аналізу існуючих технологічних методів що забезпечують в поверхневих шарах задані параметри зміцнення.

## **Abstract**

Master's certification work on the topic: "Technological support for strengthening the surface layer of machine parts."

**Actuality of theme.** One of the current ways to increase the reliability and durability of machines is to obtain the specified properties of the surfaces of parts at finishing operations, including methods of surface hardening. Technological capabilities of surface plastic deformation methods in combination with high productivity of hardening operations make it one of the most modern and promising ways to strengthen machine parts.

Research aimed at improving the known and developing new highly efficient ways to strengthen machine parts, which would provide a high level of their performance properties, remains relevant.

**Purpose and objectives.** Improving the performance of machine parts by creating technological methods in the surface layers of the specified parameters of hardening. This requires:

1. Establish the relationship between the technological parameters of the process and the characteristics of the reinforced layer.
2. To establish the influence of the degree of plastic deformation of the surface layer on the strength of parts.
3. Determine the level of residual stresses in the surface layers after plastic deformation.
4. Calculate the optimal technological parameters of the mode of hardening.

### **Object of study.**

Technology to increase the wear resistance of machine parts.

### **Subject of study.**

Regularities of formation of parameters of quality of a surface layer on an

example of processing of a detail "Lever".

**The practical significance of scientific results.**

Improving the performance of the part "Lever" by finding and analyzing existing technological methods that provide in the surface layers of the specified parameters of hardening.

## Вступ

В наш час у машинобудуванні відбувається модернізація, що спрямована на значне підвищення ефективності як виробництва так і конкурентоспроможності продукції, що випускається. Освоєння прогресивних технологій забезпечується переважно за рахунок придбання імпортного обладнання та інструментів і, меншою мірою, шляхом впровадження нових технологічних процесів.

Однією з тенденцій розвитку технології машинобудування, окрім традиційних вимог щодо постійного підвищення продуктивності, точності і якості оброблення деталей, все більш активно висувається умова екологічності їх виготовлення. При цьому вимога екологічності виробництва стосується не лише комфортності умов праці, а й зменшення матеріало- та енергоємності виробів, що безпосередньо впливає на їх економічність і конкурентоспроможність.

У порівнянні з фінішними операціями оброблення з використанням абразивного інструменту та примусового охолодження зони різання кращими з точки зору екології представляються процеси поверхневого пластичного деформування (ППД).

Процеси зміцнювального оброблення безперервно розвиваються в якості методу фінішного оброблення поверхонь деталей машин. Оброблення методами поверхневого пластичного деформування (ППД) полягає в силовому контактному впливі деформуючого інструмента на поверхню заготовки в умовах їх відносного руху.

У даній роботі було проведено порівняльний аналіз існуючих методів поверхневого пластичного деформування та обраний найкращий з методів для технологічного забезпечення зміцнення поверхневого шару деталей машин



## Зміст

Реферат .....	4
Abstract .....	6
Вступ .....	8
РОЗДІЛ 1.....	11
1.1 Постановка проблеми.....	11
1.3 Аналіз.....	16
1.3.1 Статичні методи.....	16
1.3.2 Динамічні методи.....	18
1.4 Особливості вибору методів зміцнення деталей ППД.....	22
РОЗДІЛ 2 .....	25
2.1 Аналіз вхідних даних .....	25
2.2 Характеристики деталей.....	25
2.3 Вибір методів ППД .....	28
2.3.1 Охоплююче поверхневе пластичне деформування.....	31
2.3.2 Поверхневе пластичне деформування з використанням відцентрового обкатника. ....	34
2.3.3 ППД поперечної обкатки плоскими плитами. ....	36
2.3.4 Обробно-зміцнююча обробка з осцилюючим вигладжуванням.....	38
2.4 Поверхневе зміцнення виробів складної форми з використанням комплексних схем деформування.....	43
2.5 Залежність механічних властивостей пластично деформованого поверхневого шару від параметрів процесу .....	50
2.6 Вплив параметрів процесу ППД на технологічну спадковість .....	53
2.7 Обкочування заготовки роликком. Напружено – деформований стан поверхневого шару.....	59
2.8 Ізостатичний метод ППД.....	61
2.9 Вигладжування з ультразвуком.....	66
2.10 Висновки розділу.....	71
РОЗДІЛ 3.....	72

3.1 Напружено-деформований стан в осередку деформації. Глибина пластично деформованого шару .....	72
3.2 Моделювання процесу обкочування заготовки роликом.....	76
3.3 Оцінка використаного ресурсу пластичності в поверхневому шарі металу .....	Ошибка! Закладка не определена.
3.4 Висновки до розділу.....	77
РОЗДІЛ 4 .....	78
4.1 Розроблювання стартап – проекту .....	78
4.2 Технологічність проекту .....	79
4.3 Аналіз попиту продукту .....	79
4.4 Розроблення ринкової стратегій .....	83
4.5 Розроблення маркетингової програми.....	85
4.8 Висновки.....	87
ВИСНОВКИ .....	88
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ .....	89

## РОЗДІЛ 1.

### 1.1 Постановка проблеми

Маємо ряд схожих за властивостями та матеріалом виготовлення деталей, поверхні яких потребують зміцнення для їх подальшого використання. Для зміцнення матеріалів поверхні необхідно виконати додаткові операції

### 1.2 Фізичні основи деформаційного зміцнення металів

Метали - це кристали що мають трьох мірну періодичність атомів. Геометрична модель такої структури має вигляд тривимірної ґратки, в якій в свою чергу розміщуються атоми. Структури металів поділяються на ряд видів залежно від характеру розміщення атомів в кристалічній ґратці. Більшість металів при цьому має кубічну об'ємноцентровану, або кубічну гранецентровану або гексагональну ґратку.

Сили відштовхування і притягання між атомами забезпечують стабільність кристалічної ґратки. Енергію взаємодії між двома атомами у кристалічній решітці можна отримати за допомогою рівняння:

$$U = \left( -\frac{A}{r^m} \right) + \left( \frac{B}{r^n} \right) \quad (1)$$

де  $A$  і  $B = \text{const}$ ;  $m$  і  $n$  - показники ступеню сил протягування і відштовхування ( за умови що  $n$  завжди більше  $m$  );  $r$  - відстань між атомами у кристалічній ґратці.

Найменша потенціальна енергія між парою атомів (  $U = U_0$  ) досягається для  $r = r_0$ , за умов  $dU / dr = 0$  і  $Am / r_0^{m+1} = Bn / r_0^{n+1}$ .

Враховуючи ці умови рівняння (1) отримує вигляд рівняння сил зв'язку:

$$\frac{dU}{dr} = P = \frac{Am}{r_0^{m+1}} \left[ \left( \frac{r_0}{r} \right)^{m+1} - \left[ \left( \frac{r_0}{r} \right)^n \right] \right] \quad (2)$$

де  $P$  - рівнодійна сил між атомами.

При дії зовнішніх напружень на кристалічну решітку відбувається зміна

відстані між атомами  $r = r_0 + \Delta r$  і, також, з рівнянь (1) та (2), ми отримаємо зміну потенціальної енергії і сили  $P$ .

Застосування формули (2) показує, що напруження, які необхідно прикласти до ідеального кристала для деформації  $\Delta r / r$ , значно (у два – три рази) перевищують напруження, які були експериментально зафіксовані в звичайних матеріалах.

Сучасний погляд на будову матеріалу, а саме, на наявність в них дефектів кристалічної ґратки пояснює різницю між фізичною та теоретичною міцністю.

Структурні дефекти значно впливають на руйнування та зміцнення металів при ППД, тому без розуміння як впливають ці дефекти на міцність металів неможливо зрозуміти і фізичну сутність зміцнення. У результаті кристалізації металу, обробки температурами або ППД у кристалах можуть виникнути дані дефекти. За геометричними ознаками вони поділяються на 4 групи: точкові, лінійні, поверхневі та об'ємні.

Точкові дефекти за розмірами можна порівнювати з розмірами атома. На відміну від інших, у чистих кристалах можливі два типи точкових дефектів (рис. 1, а): міжвузлові атоми або вакансії.

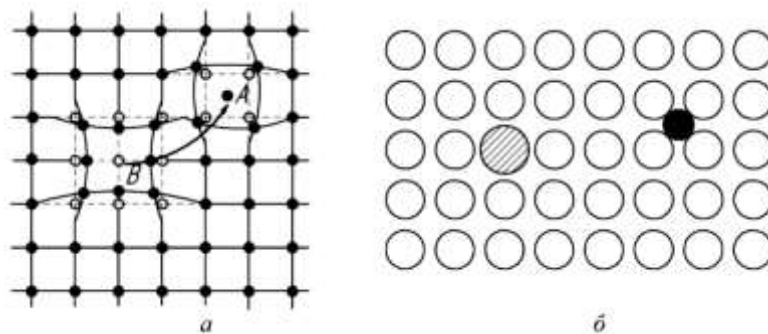


Рисунок 1.1. - Точкові дефекти у площині кубічних ґрат: а – дислокований атом А та вакансії В; б - домішкові атоми

Вакансії утворюються коли з вузла ґрат видаляється атом, а міжвузловий атом при введення в міжвузловий простір атома.

Створення міжвузлових атомів і вакансій пов'язане з можливістю атомів у положенні рівноваги при умові впливу зовнішньої енергії виходити з цього

положення, створюючи за собою порожнину (вакансію) у вузлі кристалічних ґрат та, сам атом перетворюється на міжвузловий. Більшість міжвузлових атомів і вакансій може збільшуватись при різкому охолодженню металу, ППД, опромінюванням енергетичними променями, магнітним полем, тощо. Наприклад, під час пластичної деформації кількість дефектів у кристалах можна отримати з формули:

$$n / N = (10^{-5} \dots 10^{-6}) \varepsilon \quad (3)$$

де  $n$  - максимальна кількість рівноважних точкових дефектів;  $N$  - кількість атомів;  $\varepsilon$  - деформація.

Близькими за розміром до атомних є лінійні дефекти кристалічних ґрат, у двох вимірах і мають значну протяжність у третьому. До цього виду дефектів відносять дислокації, наприклад, крайові та гвинтові.

Поверхневими дислокаціями є дефекти, що мають значну довжину лише у обох напрямках. До них належать міжфазні межі, дефекти упаковки кристалічних ґрат, межі між субзернами, зернами, скупчення дислокацій в одній площині, тощо.

Об'ємні дефекти мають протяжність вже в трьох вимірах. До них відносяться сукупність лінійних, точкових і поверхневих дефектів, які спотворюють кристалічні ґратки у великих об'ємах кристалів. Також, до об'ємних дефектів можна віднести наявність дисперсних виділень, фаз, різних краплень, а також нерівномірність деформацій і розподілу напружень у макро-об'ємах.

Спотворення у кристалічних ґратах спричиняє наявність дефектів. Виміряти спотворення ґрат можна використовуючи вектор Бюргерса (рис. 2), який характеризує сили, які діють на ґрати та енергію дислокації.

Вектором Бюргерса є вектор, що необхідно вводити в досконалий кристал (відрізок MQ на рис. 2, б),

Щільність дислокацій можна розрахувати за допомогою формули

$$\rho = L_{\Sigma} / V$$

де  $\rho$  - щільність дислокацій,  $\text{см}^{-2}$ ;  $L_{\Sigma}$  - сумарна довжина наявних дислокаційних ліній, м;  $V$  - об'єм,  $\text{м}^3$ .

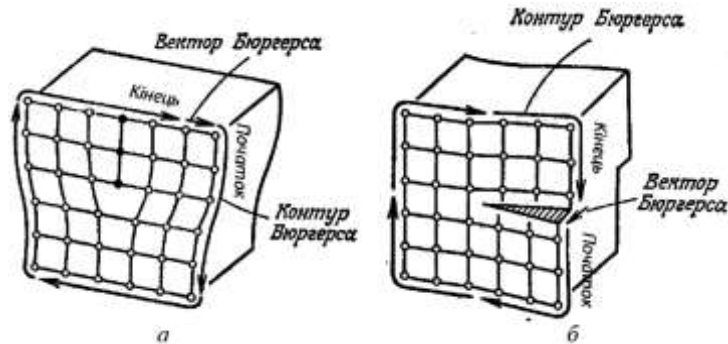


Рисунок 1.2. - Контур Бюргерса: а - для крайової дислокації; б - для гвинтової дислокації

Згідно теорії дислокацій вивчаються механізми виникнення останньої. Кристали відрізняються за просторовою орієнтацією у полікристалічних. Зерна у собі містять субзерна, які мають блоки, дезорієнтовані один відносно іншого на кут  $\leq 10^\circ$ . Межі між блоками і зернами – джерела зародження дислокацій.

Як можна побачити на схемі малокутової межі (рис. 3), грати блоків сполучаються пружно в усіх сферах, окрім тих, у яких наявні дислокації. Відстань між дислокаціями можна визначити за допомогою:

$$D = b_0 / a_3$$

де  $b_0$  - вектор Бюргерса;  $a_3$  - кут дезорієнтування.

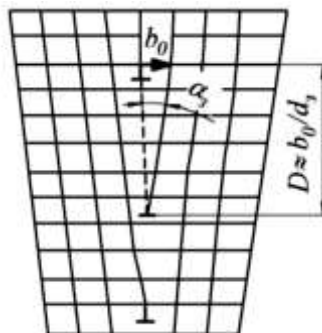


Рисунок 1.3. - Схема малокутової межі:  $D$  - відстань між дислокаціями;  $b_0$  - вектор Бюргерса;  $\alpha_3$  - кут дезорієнтування зерен.

Дислокації, що виникають під час кристалізації, за деяких умов розмножуються або зникають під час термообробки, пластичної деформації, або інших видів впливу. Модель множення дислокацій під час пластичної деформації, запропоновану Франком і Рідом, показано нижче (рисунок. 1.4).

Інтервал дислокації  $AB = L$  (рисунок 1.4, а) на кінцях закріплений. На нього діє нормальна сила  $\tau_b$ . За умови дії зростаючого напруження поведінка дислокація схожа з пружною ниткою – вигинається. За умови рівноваги напруження, можна визначити за формулою

$$\tau = 0,5Gb / R$$

де  $G$  - модуль зсуву;  $b$  - вектор Бюргерса;  $R$  - радіус кривизни.

Критичне значення напруги  $\tau_{\max}$  при цьому відповідає  $R = L/2$  (рисунок 1.4, б). Збільшення довжини при цьому відбуватиметься за напружень, менших  $\tau_{\max}$

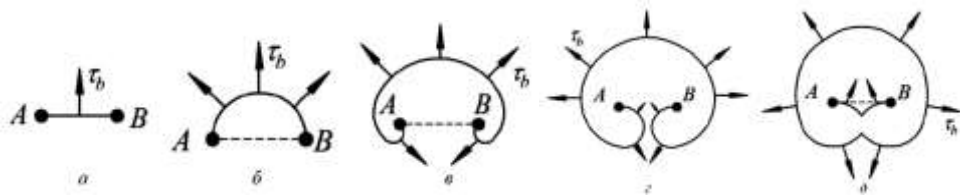


Рисунок 1.4. - Схема дії джерела Франка - Ріда

У подальшому цикл розмноження дислокацій можна побачити на рисунку. 1.4, в, г. Після завершення циклу створюється замкнена петля дислокації, при цьому ділянка АВ «готується» до генерування нової петлі.

До збільшення щільності дислокацій призводять термічна обробка та пластична деформація. Як приклад, нижче наведені типові значення щільності дислокацій різних станів матеріалу,  $см^{-2}$ :

- для монокристалу -  $10^2...10^4 см^{-2}$ ;
- відпаленого монокристалу -  $10^4...10^6 см^{-2}$ ;
- відпаленого полікристалу -  $10^7...10^8 см^{-2}$ ;
- металу після холодного ППД -  $10^9...10^{12} см^{-2}$  .

### 1.3 Аналіз

Однією з операцій, які виконуються на токарних верстатах, є поверхневе пластичне деформування (далі ППД) - вид обробки націлений на зміцнення матеріалів під час якого відбувається деформування поверхневого шару виробу без утворення зовнішніх і внутрішніх поверхонь, стружки. Під час обробки відбувається зминання, згладжування мікро-нерівностей під тиском, що в свою чергу зменшує шорсткість поверхонь до 9-го класу точності. Після деформування підвищується твердість і зносостійкість, а поверхня набуває наклепу. Операція ППД дозволяє покращувати характеристики деталей.

Напружено-деформований та фізичний стан поверхневого шару формується за рахунок ППД та локального нагріву, що виникають при обробленні. Також при цьому відбувається зміна геометрії поверхні на мікро рівні та фізико-механічних властивостей поверхні оброблюваних деталей. Поверхня яка оброблена методами ППД, має в свою чергу залишкові напруження стиску в поверхневому шарі, підвищену твердість, згладжені мікронерівності. Відповідно з цим підвищується втомна міцність, зносостійкість, стійкість до корозійного впливу, тощо.

Методи ППД отримали значного поширення завдяки економічності та значній простоті реалізації. Поділити методи ППД за характером навантажень можна на статичні та динамічні.

#### 1.3.1 Статичні методи.

Деформуючий інструмент або робочі середовища при обробленні статичними методами ППД впливають на поверхню деталей з постійним зусиллям, при цьому інструмент плавно переміщується відповідно зосередження деформації під ним по поверхні деталі, що обробляється. До статичних можна віднести такі методи як поверхневе дорнування, обкатування, вигладжування, вібраційне вигладжування, вібраційне накатування, тощо.

Статичні методи зміцнення обкочуванням роликами або кулями зазвичай застосовують як спосіб ППД для зовнішніх і внутрішніх поверхонь



обертання або площини. За такого методу обробки можна застосовувати рух вібрацією зміцнювального інструмента, що може суттєво підвищувати працездатність поверхонь. При процесі зміцнення обкочуванням відбувається вплив силою на поверхню робочих елементів під дією зусилля у разі пружного відтиснення робочих елементів під час тертя кочення або в умовах постійної деформації у випадку жорсткого розташування робочих елементів відносно поверхні деталі. Цей спосіб дозволяє створювати практично будь-яку товщини зміцненого шару та може застосовуватись до будь-яких матеріалів без обмежень. До недоліків даного способу можна віднести залежність якості зміцнення від кваліфікації робітника, так як обробку здійснюють більше на універсальних верстатах використовуючи спеціальні пристрої, що в свою чергу потребують наладки. Процес обкочування супроводжує змінювання діаметрів оброблюваної деталі у межах 0,005 ... 0,03 мм, тому необхідне встановлення відповідних припусків. Оброблювання поверхні твердосплавними або алмазними інденторами застосовують для тих самих цілей, що й обкочування. Інструмент створює канавку та поверхні та розсуває метал. Після оберту вигладжуваної деталі утворена канавка переміщується по осьовому напрямку на відрізок, рівний подачі. При цьому відбувається перекриття її під час наступних обертів кожен наступний раз, оскільки ширина канавки більша за подачу. Завдяки ППД на оброблюваній поверхні розгладжуються вихідні нерівності після чого створюється новий мікро-рельєф поверхні що має значно меншу висоту профілю нерівностей  $R$ , а розмір деталі змінюється на величину рівну залишковій деформації  $\Delta$ . Для обробки поверхні необхідне невелике зусилля що пов'язане з невеликою площею контакту інструмента, що дає можливість застосувати цей метод і для зміцнення тонкостінних деталей. Другою перевагою методу є можливість вигладжування крихких і твердих покриттів і шарів. Спосіб вигладжування має спільні недоліки з попереднім. Дорнування отвору є одним з основних методів підвищення характеристик деталі. Дорнування при обробці створює в поверхневому шарі отвори, залишкові

напруження на стиску шляхом пропускання дорна через отвір з натягом безпосередньо або через проміжні втулки. Дорнування за призначенням поділяється на поверхневе та об'ємне. При об'ємному дорнуванні пластична плинність спостерігається на всьому поперечному перерізі деталі. За призначенням дорнування можна поділити на згладжувальне, калібрувальне і зміцнювальне. Різновидом є також гідродорнування, при якому між оброблюваною поверхнею та поверхнями зубів дорна відбувається витік рідкого мастила. Для дорнування характерні такі показники як натяг; сила тяги, швидкість і геометричні характеристики самого дорна. Прикладена сила під час дорнування може бути як штовхальною тягучою. Після оброблення дорнуванням необхідне калібрування отворів за допомогою різального інструменту для забезпечення заданої точності. За умови якщо деформувальні шари металу не торкаються до плити пристрою, торцевий наплив металу та спотворення твірної стають суттєво більшими у порівнянні із спотвореннями верхнього торця. Спотворення може зменшитись, якщо обробку здійснити у пристроях, що забезпечують закріплення оброблюваної деталі по торцях. Додаткова механічна обробка матеріалу у зазначених зонах суттєво знижує ефективність зміцнення. Дорнування здійснюється на вертикально-протяжних чи спеціалізованих горизонтально-верстатах або за допомогою спеціального обладнання. Процес дорнування позначається літерою «Д».

### **1.3.2 Динамічні методи.**

Дробоструминна, віброударна, гідродробоструминна, обробка кульково-стрижневими зміцнювачами, ротаційна обробка, чеканка, ударне накочування, віброконтактний наклеп, віброобкочування, ультразвукова обробка, обробка механічними щітками, вібровигладжування та інші належать до динамічних методів обробки. При оброблюванні динамічними методами ППД робочі середовища здійснюють вплив на поверхню деталей багаторазовими зіткненнями з нею. Сила зіткнень у свою чергу змінюється в кожному циклі від найменшого до найбільшого значення. Оброблюватись

може або вся поверхня одночасно, або здійснюючи переміщення зони впливу по всій поверхні деталі послідовно, також виконується оброблення окремих ділянок деталі при потребі точкового зміцнення. Найпоширенішим способом є шротоударний, що заснований на використанні кінетичної енергії рухомого шроту, котрий розганяють стиснутим повітрям, гравітацією або рідиною під тиском, тощо. У якості робочого тіла переважно використовують сталевий шріт, який виготовляється з неметалів або кольорових сплавів, часто зі скла. Розміри шроту можуть змінюватись від 50 мкм до 6 мм залежно від області використання. Спосіб застосовується для зміцнення майже всіх типів деталей і металів для обробки їх під час виготовлення, а також для місцевої обробки, для збирання або ремонту деталей. Позначається шротоударного зміцнення – ШЗ. Якщо розгін кульок у замкненому об'ємі буде здійснюватися завдяки енергії стиснутого повітря, то такий метод є пневмодинамічним і позначається ПДЗ. Спосіб обробки, при якому використовується енергія зміцнювального середовища називається барабанно-ударний. Деталь попередньо встановлюється на щитах, що утворюють частину стінок барабана шестигранної чи прямокутної форми, або по осі барабана. У якості робочого середовища використовуються частини кубічної форми зі сталей або високоміцних алюмінієвих сплавів у випадку оброблення деталей, що виготовлені з високоміцних матеріалів. При обертанні барабану у процесі обробки частинки середовища розганяються, але відриваються від поверхні розгону у верхній точці та потрапляють на поверхню оброблюваної деталі, зміцнюючи її. Метод найбільш оптимальний для зміцнення тонкостінних деталей каркасів із алюмінієвих сплавів. Він є оптимальним по зміцненню та контролю якості. Недоліком способу є мала глибина зміцненого шару у купі з нерівномірністю його на поверхні деталі через орієнтацію ділянок деталі відносно осі обертання барабана. Спосіб є достатньо продуктивним, та позначається – БЗ. Застосування енергії віброуючого середовища характеризує віброударний спосіб ППД. У якості робочого тіла використовують абразивні гранули, сталеві кульки, тощо. Спосіб полягає у розміщені в контейнері

віброустановки робочого середовища та оброблювані деталі, які зазнають механічних коливань із значним прискореннями до 10–15 g, що впливає на робочі тіла. Вони набувають достатньої для здійснення ППД деталі енергії. Рух частинок у середовищі забезпечує рівномірну і стабільну величину наклепу та значень напружень. Характерними для способу є висока продуктивність, простота, та значні технологічні можливості: здатність оброблювати деталі будь-яких форм або розмірів незалежно від матеріалу. Віброзміцнення (ВЗ) з використанням сталевих кульок дає найкращі показники та має назву – вібронаклеп (ВН). Даний метод в середовищі наповнювача з абразивних частинок називається віброшліфуванням (ВШ). Так як інтенсивність оброблення віброударним способом обмежена, при необхідності великої глибини зміцнення краще застосовувати дробоударний спосіб. Пульсуючим шліфуванням (ПШ) називають зміцнення деталей, завантажених для деформування у контейнер з абразивом. Відповідно до цього способу зміцнення ППД абразивний матеріал знаходиться у контейнері у вільному стані та зберігає свій статичний стан під час руху через велику інерційну масу. За умови, що абразивний матеріал нерухомий, а деталь здійснює зворотно-поступальний рух в контейнері, відбувається переміщення по поверхні обробки абразивного середовища, спричиняючи зняття металу. Абразивна об'ємна обробка здійснюється таким чином. Разом з механізованою зачисткою проходить зміцнення оброблюваних деталей. Для ПШ характерні: амплітуда пульсування 80 ... 150 мм, частота 200 ... 500 коливань/хв. Також існують багато способів ударного зміцнення, які застосовують у виробництві деталей. До них належать: чеканення, відцентрово-ударний, зміцнення вибухом, ультразвуковий та ін. методи які можна віднести до динамічних.

Ми розглянули велику кількість методів зміцнення металевих деталей машин за допомогою ППД. Кожен із використовуваних пристроїв побудований для вирішення тієї чи іншої технологічної задачі або декількох задач. Їх можна класифікувати поділивши на п'ять груп у відповідності із

схемами деформування поверхні деталі в точці контакту з інструментом. Класифікація методів та пристроїв ППД наведена в таблиці 1.

Таблиця 1.1 – Методи та пристрої ППД

Група	Метод	Способи зміцнення
I (Статичне)	Накатування	1.Накатування роликком. 2.Накатування кулькою. 3.Вібраційне накатування з поперечною вібрацією. Вібраційне накатування з поздовжньою вібрацією
II (Статичне)	Зміцнення зв'язаним ударним інструментом	1. Зміцнювальна чеканка згідроприводом. 2. Зміцнювальна чеканка зпневноприводом. 3. Зміцнювальна чеканка змеханічним приводом. 4.Відцентрова обробка роликками. 5.Відцентрова обробка кульками.
III (Статичне)	Вигладжування	1.Вигладжування сферичним наконечником. 2.Вигладжування конічним наконечником.
IV (Статичне)	Дорнування	1.Дорнування проштовхуванням дорну. 2.Дорнування протягуванням дорну. Вібраційна ударна обробка. 3.Вібраційна ударна обробка.
V (Динамічне)	Динамічне зміцнення	1.Вібраційна ударно-імпульсна обробка 2.Вібраційно-відцентрова зміцнювальна обробка. 3.Гідрогалтування дробом. 4.Гравітаційна обробка дробом. 5.Гідродробоструменева ежекторна обробка. 6.Гідродробометна обробка. 7.Пневмогідродробоструменева обробка. 8.Пневмодинамічна обробка. Дробоструменева обробка

Найбільш ефективними методами зарекомендували себе методи динамічного зміцнення, що засновані на динамічній дії інструмента на оброблювану поверхню деталі. Обробка динамічними методами ППД на відміну від статичних способів, дозволяє енергетично вигідніше впливати на матеріали деталей, обробляти додатково фасонні профілі, забезпечуючи задану точність і якість поверхневого шару деталей.

#### **1.4 Особливості вибору методів зміцнення деталей ППД**

Фізичні та механічні властивості поверхневого шару деталі значно відрізняються від внутрішніх. Відмінності можуть бути обґрунтовані спадковістю оброблення або впливом експлуатаційних умов деталі. Атоми, що знаходяться на поверхні деталей, характеризуються однобічними зв'язками з металами, що сприяє їх активізації, у наслідку чого поверхня деталі вбирає в себе атоми елементів навколишнього середовища. Поява сполук основного металу з речовинами, що проникають ззовні притаманна дифузійним процесам в поверхневому шарі. Для легуючих елементів існує можливість перерозподілу у поверхневому шарі, що у подальшому призводить до зниження експлуатаційних властивостей. Види зовнішніх впливів такі як тепловий, механічний, магнітоелектричний, світловий та інші, спричиняють значне збільшення спрацьовування поверхневих шарів деталі, його корозії, ерозії, появу тріщини від утомленості, кавітації, тощо. При цьому значно погіршується робота поверхневих шарів враховуючи негативні впливи у процесі оброблення деталей або складання конструкційних елементів, що супроводжуються появою поверхневих подряпин, рисок, задирок, ум'ятин, та інших дефектів. Навіть при ретельному механічному обробленні тяжко запобігати мікро подряпинам поверхні, які є місцями концентрації напружень. Більш сприятливий мікро-рельєф поверхні деталі в свою чергу може надавати додаткове поверхнєве зміцнення, що створює на поверхні залишкові стискальні напруження. У результаті цього підвищуються міцність, опір відриву, твердість та утомна міцність поверхні.

Зміцнення поверхні завдяки наклепу, залишковим напруженням стискування, та сприятливому мікро-профілю поверхні значно підвищує витривалість і характеристики деталей у порівнянні з механічним обробленням у декілька разів, також повністю або частково знижує шкідливий для витривалості вплив покриттів і корозійних середовищ, конструктивних концентраторів напружень. Основним методом поверхневого зміцнення у наш час є зміцнення за допомогою ППД, який полягає у створенні нерівномірної деформації поверхневого шару деталі у пластичній та пружно-пластичній сферах, після чого в цьому шарі в процесі розвантаження виникають напруження високої інтенсивності. Ці внутрішні напруження потім врівноважуються залишковими напруженнями розтягування які мають низьку інтенсивність в середніх шарах матеріалу. Технологію ППД можна застосувати практично до всіх конструкцій із металів, зокрема, у заготівельно-штампувальному, складальному виробництвах, механічному та слюсарно-зварювальному. Тривалі дослідження встановили, що ресурс деталі із конкретного матеріалу визначається більшою мірою станом поверхневого шару і меншою мірою станом вже внутрішніх шарів матеріалу деталі. Тому одне з основних питань, яке необхідно вирішити є забезпечення високої опірності поверхневого шару під час проектування та виготовлення конструкцій. Зміцнення за допомогою ППД бажано проводити по всіх поверхнях деталей та вузлів, тому доцільно призначати його в тих випадках роботи елементів конструкції, коли наявні повторні навантаження в умовах розтягу-стиску, згину та скручування, розтягу. Вибір інструментів для зміцнення ППД здійснюється на основі технологічних особливостей конструкції, враховуючи такі умови: відповідність габаритів деталей можливостям обраного виду устаткування; – метод зміцнення, технологію та устаткування вибирають за складністю геометричних форм обирають, можливість проведення зміцнення без викривлення форм - за жорсткістю деталі; – за характером і глибиною послабленого поверхневого шару можна визначити можливості його часткового або повного вилучення або зміцнення

на величину, що помітно перевищує глибину послабленого шару. Обираючи методи і засоби зміцнення ППД необхідно враховувати технічні можливості для досягнення мінімальної шорсткості і продуктивність самого устаткування. Матеріали для робочих інструментів повинні мати вищі фізико-механічні властивості від матеріалів оброблюваних деталей, такі як: висока твердість, здатність протистояти ударним навантаженням та стиранню та під час ППД, високі межі міцності на стиск, низький коефіцієнт тертя по поверхні, велику теплоємність і теплопровідність, високу адгезійну здатність.



## **РОЗДІЛ 2**

### **2.1 Аналіз вхідних даних**

Питання забезпечення міцності поверхні деталей вже давно було вирішене, але у багатьох існуючих методів поверхневого пластичного деформування наявні мінуси:

- Збільшення внутрішніх напружень
  - Деформація поверхонь
  - Низька швидкість обробки
  - Складність робіт

На основі існуючих проблем та наших можливостей, ми виконали аналіз існуючих методів та пристроїв ППД та визначили на основі розрахунків і(або) тестів найбільш оптимальний варіант для нашого типу деталей. Для порівняння будуть наведені часто використовувані методи ППД. Буде вирішена проблема якості кінцевої поверхні. Таким чином ми максимально покращимо експлуатаційні властивості наших деталей.

### **2.2 Характеристики деталей**

У роботі розглядається питання зміцнення поверхні для типу деталей «Важіль» що виготовляються з матеріалу Сталь. Ці деталі під час експлуатації зазнають значних навантажень, тому необхідно визначити який з методів оброблення буде найбільш оптимальним та завдяки якому ми отримаємо найкращі експлуатаційні якості.

Наведемо декілька прикладів деталей які потребують оброблення поверхневим пластичним деформуванням:

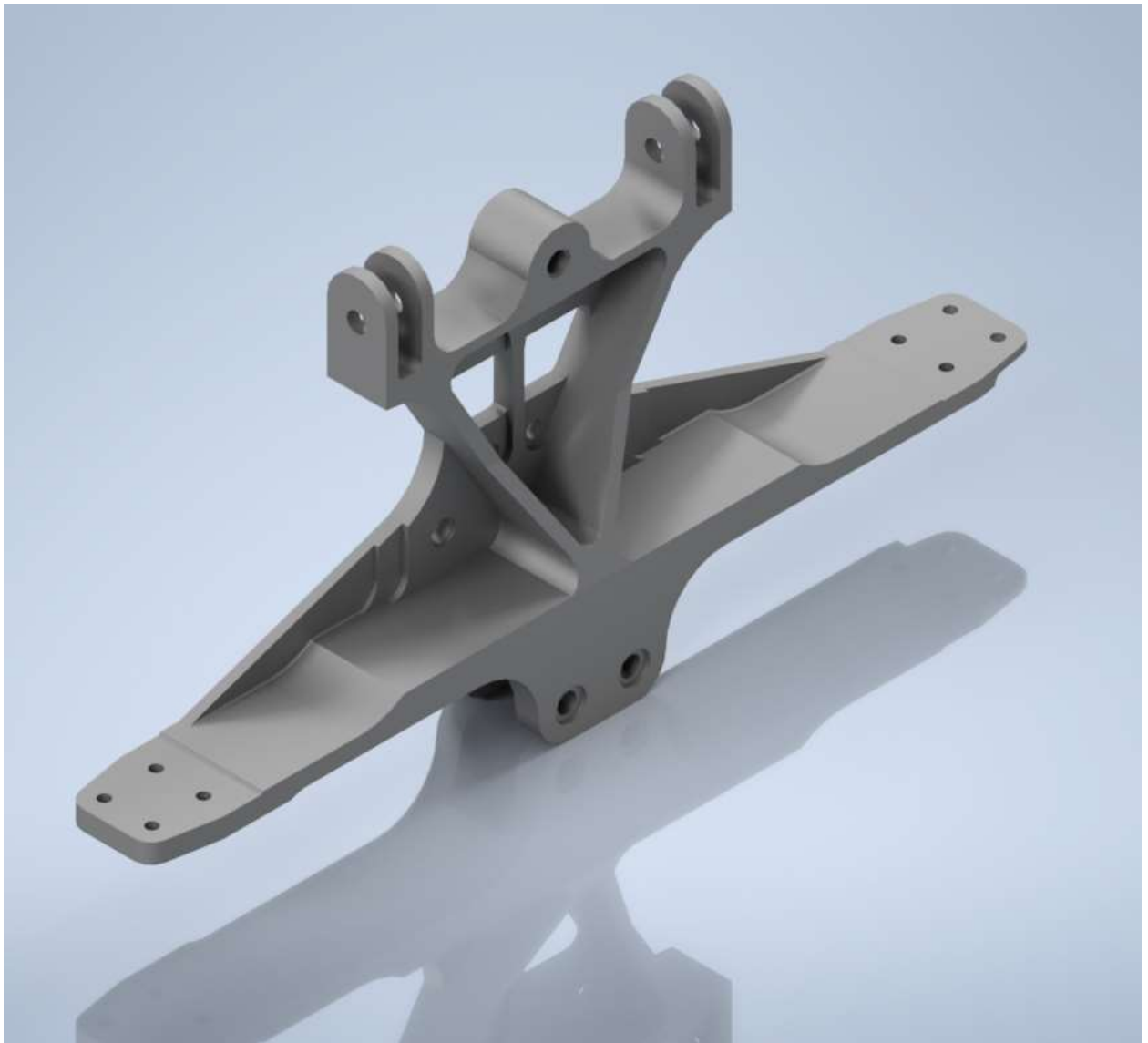


Рисунок 2.1.- деталь «Важіль»

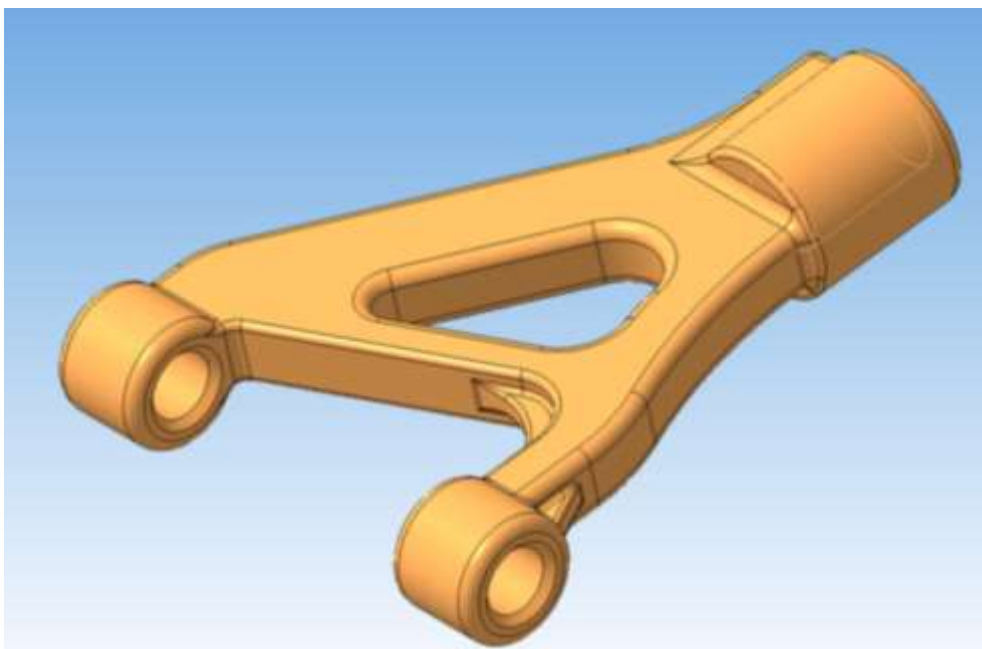


Рисунок 2.2.-деталь «Важіль»



Рисунок 2.3.- деталь «Важіль»



Рисунок 2.4. – деталь «Важіль»

Усі наведені деталі виготовлені з матеріалу Сталь та використовуються у авіа або автомобілебудуванні.

### 2.3 Вибір методів ППД

Розглянемо існуючі методи ППД, які могли б задовільнити експлуатаційним вимогам заданих деталей.

Вибір методу та інструменту ППД можна здійснювати за наступною схемою:

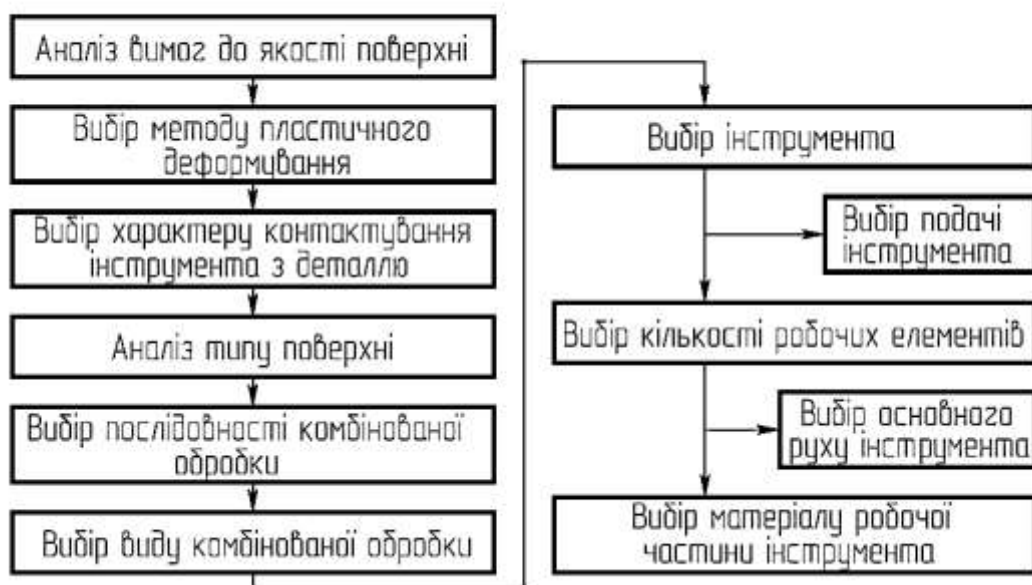
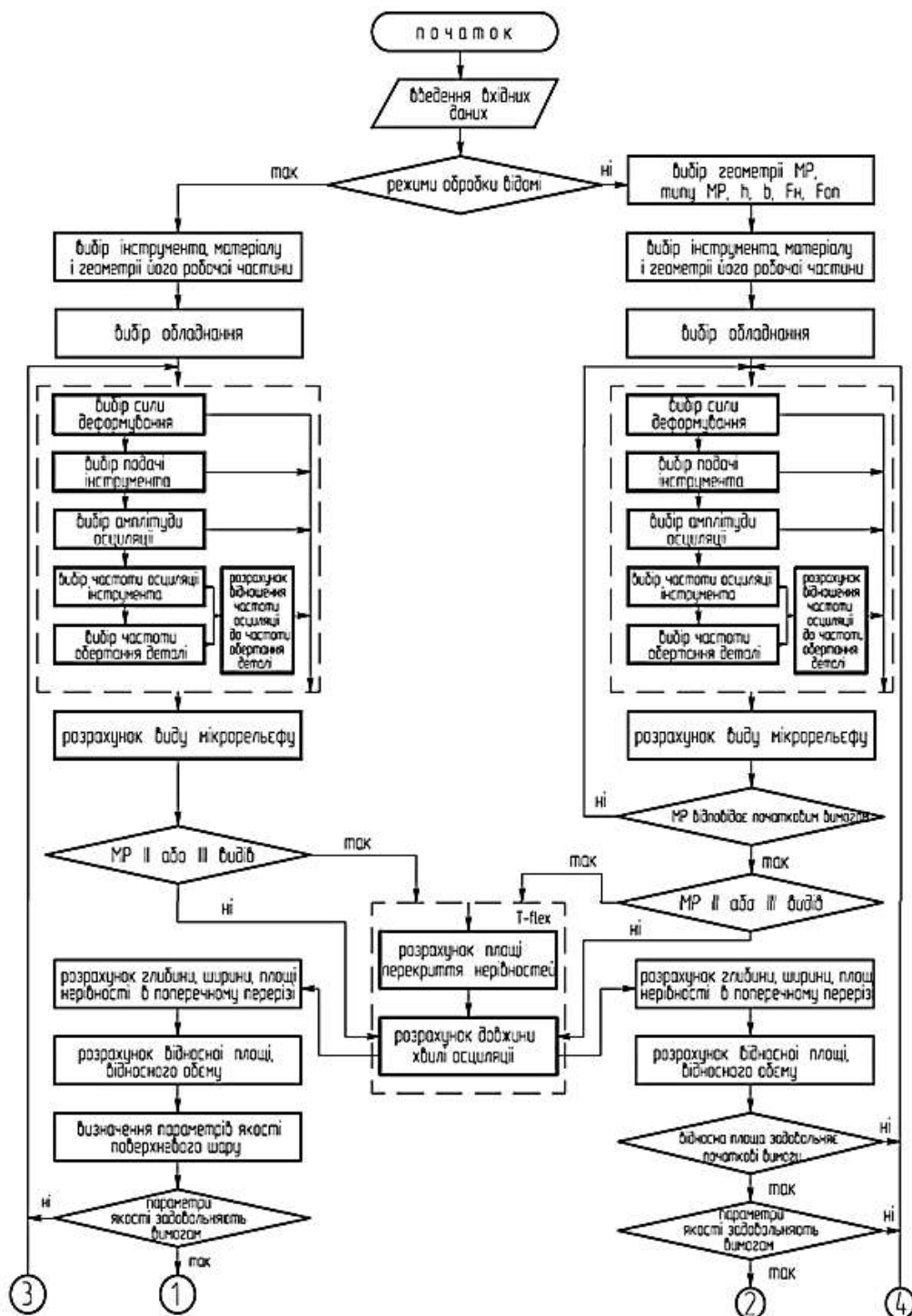


Рисунок 2.5.- Алгоритм вибору способу обробки

Для покращення процесів обробки операції пластичного деформування можна поєднувати з попередніми операціями різання або комбінувати різні способи ППД для отримання кращих характеристик. Як інструменти при фінішних операціях, що здійснюються шляхом різання і є попередніми до пластичного деформування в промисловості можна використовувати: фрези, шліфувальні круги, різці. Як інструменти для ППД можна обирати вигладжувачі різної форми, кульки, ролики, бойки, дорни, з одним або кількома робочими елементами. Існують методи комбінованої обробки, при яких поєднуються в собі ППД як один з елементів. Їх можна поділити наступним чином: комбіновані способи власне ППД, ППД з випереджаючим різанням, ППД, яке випереджає процеси різання, при цьому спосіб контакту

між інструментом і деталлю пружним або жорстким. Проаналізувавши методи ППД розробили алгоритм за яким можна обрати саме комбіновану обробку. Алгоритм представлений на рисунку 2.5 та на рисунку 2.6 представлено загальний алгоритм за яким можна керувати процесом формування експлуатаційних властивостей та якості самої поверхні при комбінованих процесах обробки.



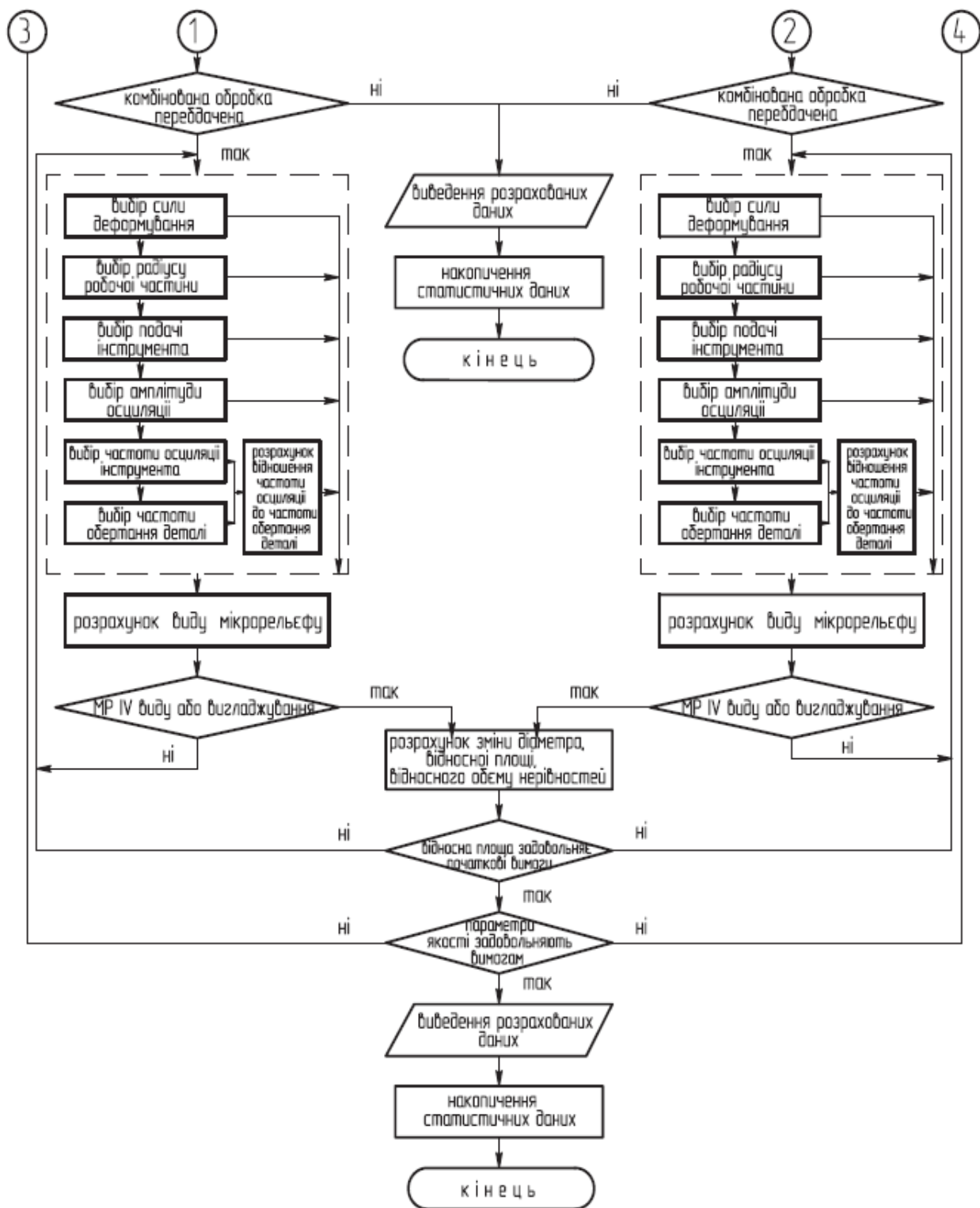


Рисунок 2.6. –Алгоритм керування процесом формування експлуатаційних властивостей та якості поверхні

Першим прикладом розглянемо способи ППД, які були розроблені в Іркутському національному дослідницькому технічному університеті.

### **2.3.1 Охоплююче поверхнєве пластичне деформування.**

Аналіз на технологічність довгомірних мало жорстких виробів показав, що в деяких випадках для виготовлення деталей машин доцільно використовувати способи обробки металів тиском (ОМТ), які можуть бути реалізовані на трьох стадіях технологічного процесу: заготівельної, формоутворюючої і обробної. використовуючи металургічні процеси волочіння і калібрування, можна отримувати заготовки максимально наближені за формою і розмірами до готових деталей.

В умовах машинобудівного виробництва заготовки можуть бути доведені до форми готових деталей при використанні, наприклад, процесу редукування через жорстку матрицю. Остаточно задані розміри деталей, якість поверхні і напружено-деформований з стояння поверхневого шару можна отримати ППД, що дозволяє сформувати високу якість поверхневого шару.

Однак при зміцненні довгомірних і мало жорстких циліндричних деталей можливості існуючих локальних методів зміцнення значною мірою вичерпані: при обмеженій продуктивності вони не забезпечують необхідну точність діаметральні розмірів і стабільності геометричної форми. Для зміцнення деталей зазначеного типу доцільний відхід від традиційних схем обробки. Як перспективний напрям запропонований спосіб охоплюючого поверхневого пластичного деформування (ОППД), який реалізує схему осесимметричного навантаження на обмеженій ділянці виробу. Спосіб відрізняється високою продуктивністю і дозволяє змінювати характеристики формованого поверхневого шару в широких межах.

Пластичне деформування при осесимметричному навантаженні має в деяких випадках явні переваги в порівнянні з локальними методами поверхневої пластичної обробки:

- висока продуктивність процесу за рахунок великих швидкостей деформування;
- забезпечення стабільності діаметрального розміру по довжині

заготовки і значне зменшення похибки вихідного розміру;

- отримання заданого розміру за один прохід при припусках, що перевищують на порядок і більше припуски, що встановлюються для поверхневого пластичного деформування;

- шорсткість зміцнених поверхонь порівнянна з шорсткістю, що має місце при фінішних операціях.

Кінематична простота ОППД, коли обробка здійснюється лише за рахунок осевого переміщення заготовки або інструменту, привертає увагу і виробничників. Однак реалізувати такий принцип обробки вдається не завжди і не відразу - обриви, тріщини, розшарування, викривлення і інші дефекти свідчать про те, що уявна простота процесів є вдаваною.

Реалізувати цю технологію можна двома способами: охоплює деформування за схемою стиснення (рисунок 2.7, а) і охоплює деформування за схемою розтягування заготовки (рисунок 2.7, б).

Як деформуючий інструмент при цьому використовують кільцевий індентор - матрицю. Робочі деформуючі інструменти (фільєри, волокни, матриці) складаються з трьох основних частин: робочої, що має форму усіченого конуса, калібрує (циліндричної) частини і вихідний частини у вигляді зворотного конуса.

При практичній реалізації запропонованих процесів пластичного деформування виникає ряд нових проблем. Одна з них відноситься до виявлення напружено-деформованого стану оброблених виробів. Практика ОМД показує, що в деяких випадках холоднодеформовані вироби отримують тріщини, які призводять до руйнування матеріалу (рисунок 2.8).

Визначення напружено-деформованого стану (НДС) в осередку деформації є ключовим питанням для розуміння сутності технологічного процесу і виявлення чинників, що впливають на якість і експлуатаційні характеристики деталей машин і вироби в цілому. Напружений стан пружно-пластичного матеріалу в осередку деформації є основною інформацією для визначення за результатами розвантаження залишкових напруг.



На основі теорії малих пружно деформацій і методу скінченних елементів побудована математична модель процесу охоплює зміцнення, що дозволяє визначати поточне і залишкове напружено-деформований стану в довільній точці навантаженого осесиметричного тіла. Достовірність запропонованої моделі зміцнення підтверджена відомим аналітичним рішенням (завдання Ламі) і експериментальними результатами по деформованому і залишковим напруженим станам.

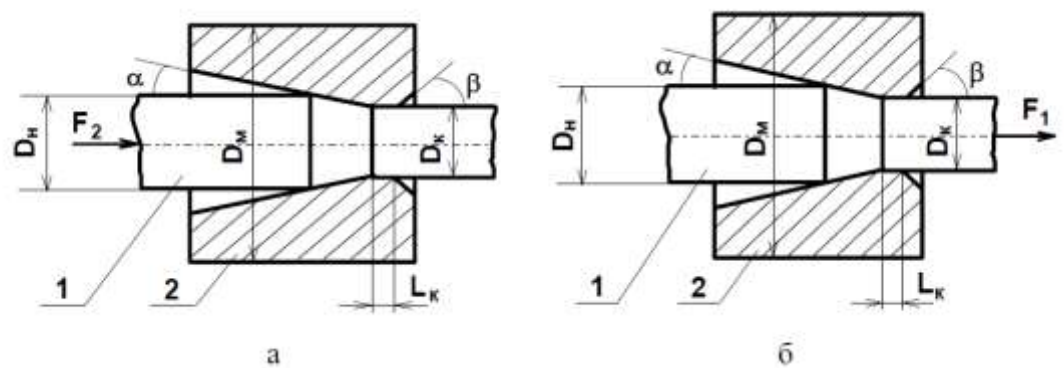


Рисунок 2.7.- Технологічні схеми охоплює деформування за схемою стиснення (а) і розтягування (б) заготовки (1 - заготовка; 2 - матриця)



Рисунок 2.8.- Дефекти виробів з каліброваного металу: а - розкриття кінця прутка при виході з матриці; б - тріщина на кінці заготовки після холодного деформування; в - спотворення форми заготовки при фрезеруванні поздовжнього паза; г - тріщина на поверхні деталі після обробки різанням

На рівні винаходів розроблені технологічне обладнання та оснащення для охоплює зміцнення. Конструктивні та технологічні рішення захищені патентами РФ. Так, для зміцнення переважно довгомірних виробів спроектований і виготовлений універсальний верстат для реалізації ОППД за схемою розтягування і стиснення заготовки. В умовах серійного виробництва

відносно короткі деталі типу осей і втулок можна зміцнювати на верстаті, що працює в напівавтоматичному режимі. Для зміцнення окремих кінцевих ділянок деталей типу валів спроектований верстат, що забезпечує співвісність оброблених поверхонь. Для реалізації охоплює деформування на універсальному пресовому обладнанні розроблена технологічне оснащення, що працює в автоматичному режимі.

### **2.3.2 Поверхнєве пластичне деформування з використанням відцентрового обкатника.**

У деяких випадках і ОППД має обмеження щодо застосування. Це стосується залишкового напруженого стану в зміцнених виробах. Експериментальними дослідженнями і розрахунковими даними встановлено, що залишкові напруги при охоплює деформації вельми чутливі до ступеня відносного обтиску. Це призводить до того, що навіть величина поля допуску на заготовлю впливає на величину відносного обтиску, а отже, на величину і характер розподілу залишкових напружень. Таким чином, виконуючи охоплює деформування через жорстку матрицю, можна отримати заготовки з різним рівнем залишкових напруг, що не забезпечує стабільності заготовок по напруженого стану.

Аналогічні проблеми мають місце і при використанні відомих локальних методів поверхневого деформування. Створювані при ППД залишкові напруги характеризуються величиною, знаком і глибиною залягання. Всі ці величини залежать від багатьох чинників, серед яких основними є умови проведення поверхневої пластичної обробки і механічні властивості оброблюваного матеріалу.

Багато дослідників відзначають надзвичайну важливість рівномірності обробки, що забезпечує однорідність деформації, врівноваженість залишкових напруг їх рівномірну релаксацію при експлуатаційному навантаженні. На відміну від жорстких валів виконання цієї умови залежить не тільки від конструкції інструменту і режимів зміцнення, а й від механічних властивостей поверхневого шару, закономірностей його мікро

пластичної деформації при технологічному впливі, релаксаційної стійкості при експлуатації.

Вибір конструкції робочого інструмента визначається основними якісними показниками обробки поверхневого шару. Однорідність зміцнення, відсутність зігнутості вала, мала величина залишкових напруг, їх врівноваженість і рівномірна релаксація під час експлуатації та інші показники пов'язані з величиною зусилля притиску інструмента. Інструмент повинен забезпечувати сталість цього зусилля при будь-яких змінах форми деталі, наявності просторової похибки і коливань в технологічній системі.

Щоб позбутися від більшої частини проблем, обумовлених динамікою взаємодіє наслідком частин технологічної системи, необхідно зупинити обертання деталі, вивести її з безпосередньої взаємодії з патроном, задньою бабкою і люнетами. При такій схемі обробки неможливе утворення початкових напруг від закріплення в патроні і задньої бабки, так як є можливість поздовжньої деформації будь-якої величини. В цьому випадку для забезпечення обробки ППД всій поверхні нежорсткого валу необхідно обертати інструмент. Для виключення деформації вигину заготівлі зусиллям притиску деформуючого елемента необхідний інструмент з повним силовим замиканням.

Для створення робочого зусилля притиску деформуючого тіла (кульки, ролика і ін.) В даний час використовується досить широкий спектр різних конструкцій. Відцентровий інструмент більш кращий для забезпечення високої продуктивності при заданій якості і стабільності процесу обробки. До недоліків відомих конструкцій відцентрових Розкатники слід віднести велику частоту обертання інструменту. Для генерації робочого зусилля необхідної величини, що забезпечується силою інерції при малій масі роликів, потрібна велика частота обертання інструменту, яку не забезпечує стандартне обладнання. висока частота обертання призводить також до виникнення вібрацій, що, безсумнівно, позначається на однорідності обробки. Найбільш простим рішенням проблеми збільшення робочого

зусилля, генерованого відцентровою силою, є застосування системи важеля. Така компоновка відцентрового обкатника була розроблена і запатентована ІРНІТУ. На криволінійному важелі закріплюється деформуючий елемент і вантаж (рисунок 2.9).

Вся система обертається відносно нерухомої осі заготовки, і сила інерції вантажу створює момент щодо точки закріплення важеля, який врівноважується моментом робочого зусилля щодо тієї ж точки. При малій довжині плеча криволінійного важеля щодо точки закріплення важеля зростає величина робочого зусилля. Таким чином, деформуючий зусилля регулюється співвідношенням плечей і величиною вантажу. При великій величині вантажу достатні для обробки ППД зусилля виникають при частоті обертання, що забезпечується стандартним обладнанням. Використання відцентрового обкатника дозволяє регулювати величину жорсткості на вигин оброблюваної деталі установкою двох додаткових опор як в конструкції обкатника, так і поза ним на станині верстата. Якість зміцненого шару при використанні відцентрового обкатника викладено в роботах.

### **2.3.3 ППД поперечної обкатки плоскими плитами.**

Відомі способи ППД не дозволяють обробляти невеликі за габаритами деталі малої жорсткості у вигляді осей, валиків, пальців, так як вони легко згинаються при навантаженні деформуючим інструментом. Є і ряд інших деталей машин, в яких відсутні центрові отвори, що не дозволяє закріплювати їх в центрах металорізальних верстатів. Для обробки - зміцнюючої обробки зазначеного класу деталей запропонована схема обкатки плоскими плитами.

Процес поперечної обкатки плоскими плитами аналогічний процесу поперечно-клинової прокатки, процесу накатки профілю на кріпильні вироби. Основними параметрами поперечно-клинової прокатки є ступінь обтиску і геометрія інструменту. У процесі поперечної обкатки інструмент має вигляд плоскої плити з малим кутом заходная частини  $\alpha_1$  (рисунок 2.10). Малий кут  $\alpha_2$  в вихідній частини інструмента служить для

зменшення концентрації напруги при виході деталі із зони обробки. Тому для процесу поперечної обкатки основним параметром режиму обробки є ступінь відносного обтиску  $Q$ .

$$Q = \frac{F_u - F_{np}}{F_{np}} = \left(1 - \frac{d^2}{D^2}\right) \cdot 100\% ,$$

де  $F_u$  - площа вихідного перетину заготовки;  $F_{np}$  - площа поперечного перерізу заготовки після обкатки;  $D$  - вихідний діаметр заготовки;  $d$  - діаметр заготовки після обкатки.

Кінематика процесу поперечної обкатки плоскими плитами і режими обробки викладені в роботах.

Відмінною особливістю зміцнюючої обробки на плоских плитах є: висока продуктивність процесу, можливість автоматизації технологічного процесу, відсутність необхідності закріплення деталі перед

обробкою, відсутність центрових отворів, доступність повної обробки циліндричної поверхні без переустановлення деталі, відсутність вигину при зміцненні, можливість обробки тонких (маложестких) деталей. Для реалізації процесу зміцнення поперечної обкаткою плоскими плитами в умовах багатосерійного виробництва розроблена нова конструкція обкатані верстата.

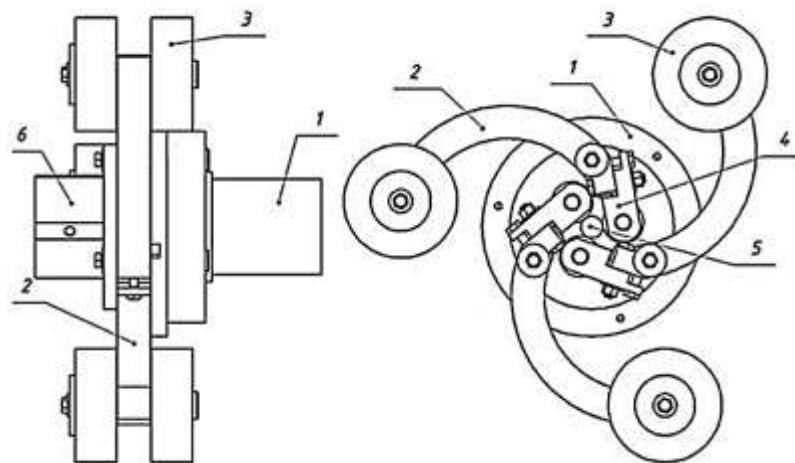


Рисунок 2.9.- Відцентровий обкатник: 1 - корпус; 2 - важіль; 3 - вантаж; 4 - державка з деформуючим роликом; 5 - обкатувати деталь; 6 – додаткова опора (захисний кожух прибраний).

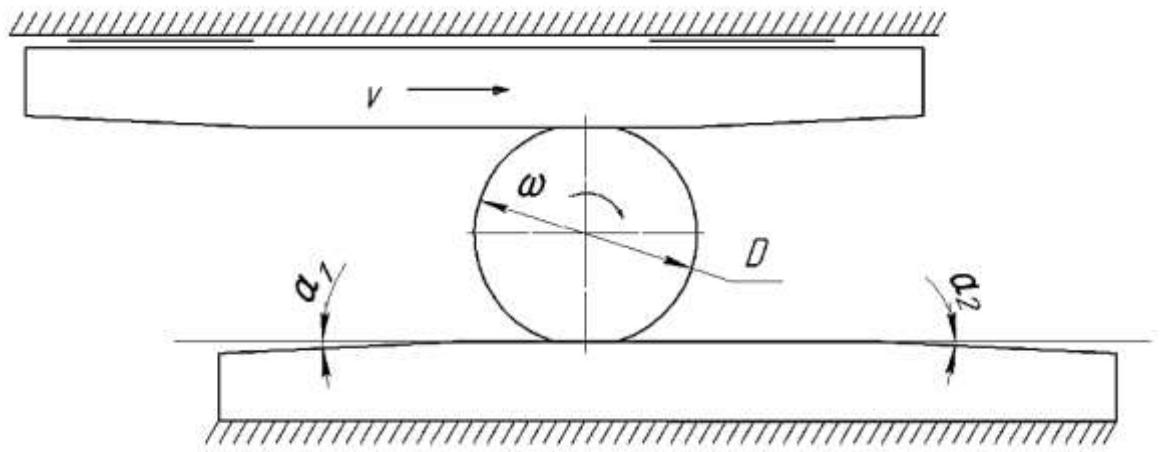


Рисунок 2.10.- Схема процесу поперечної обкатки плоскими плитами.

#### 2.3.4 Обробно-зміцнююча обробка з осцилюючим вигладжуванням.

Ефективним напрямком удосконалення методів ППД є застосування додаткових коливальних і коливальних рухів, які дозволяють крім обробно-зміцнюючої обробки формувати регулярний мікрорельєф на зміцнюючій поверхні. При вдосконаленні методів оздоблювальної обробки поверхонь і створення регулярного мікрорельєфу професором Ю.Г. Шнейдером запропонована схема вібраційного обкатування, а професором М.Є. Поповим розроблена технологія і інструментальне оснащення осцилюючими ППД.

Запропоновані методи зміцнюючої обробки відрізняються кінематикою деформуючого інструменту, який здійснює зворотно поступальний рух уздовж або поперек осі деталі. При цьому кожна мікро зона поверхневого шару зазнає утиску в різних напрямках. Зміна знаку напружень відображена ефектом Баушінгера і проявляється в зміні механічних властивостей зміцнюваного матеріалу. На відміну від методів обробки, розроблених Ю.Г. Шнейдером і М.Є. Поповим, в пропонуваному методі робочий інструмент здійснює зворотно-поступальний рух в напрямку, перпендикулярному осі деталі, в той час як відомі схеми обробки реалізують коливальний рух інструменту.

Схема осцилюючого вигладжування циліндричних деталей представлена на рисунку 2.11. В якості робочого інструмента використана пластина, що має округлення на одному з торців по радіусу  $r$ . Ця частина пластини є

робочим елементом, який притискається до обертової оброблюваної заготівлі. Пластина може повертатися відносно вертикальної площини на деякий кут  $\alpha$  (див. рисунок. 2.11.), а також здійснювати осцилююче вертикальний рух щодо осі заготовки і переміщатися по напрямку подачі  $S$ . В результаті складної взаємодії заданих параметрів на оброблюваній поверхні формується мікрорельєф, що складається з синусоїдальних канавок різної композиції і щільності. Освіта на обробленій поверхні системи канавок, що перетинаються між собою з певною закономірністю, покращує процес змащування пар. Встановлено, що такі системи утворюють штучні «масляні кишені», в яких утримується мастило, що перешкоджає «схоплюванню» контактуючих поверхонь тертьових пар; формують на поверхнях деталей регулярні нерівності різної форми розташування в залежності від необхідних експлуатаційних характеристик і властивостей; створюють на сполучених циліндричних поверхнях гвинтові мікро шліци; забезпечують декоративну обробку поверхонь деталей замість трудомісткою абразивні препарати.

Вплив параметрів осцилюючого вигладжування (поздовжня подача, натяг, частота обертання заготовки і кут нахилу робочого інструмента) на якість зміцнених деталей викладено в роботах. Інтенсифікація напружень при ППД. При поверхневому пластичному деформуванні деталей малої жорсткості (тонкостінні, довгомірні деталі) можливості локальних методів зміцнення обмежені. Це пов'язано з малою згинальною жорсткістю заготовки, вібраціями в механічній системі, складністю досягнення заданої якості деталей, точності продуктивності обробки, а також з відсутністю необхідного технологічного обладнання. Пластичне деформування поверхневого шару викликає значні деформації і переміщення частинок металу, що негативно позначається на геометричній формі виробів.

З урахуванням вище викладеного виникло питання про необхідність інтенсифікації напружено деформованого стану в осередку деформації технологічних способів поверхневого пластичного деформування для досягнення високих якісних показників при обробці мало жорстких деталей.

З цією метою були розроблені нові технологічні схеми ППД, що забезпечують інтенсифікацію напруженого стану в осередку пружно-пластичної деформації. У практиці ППД відомі і широко використовують дві схеми зміцнюючої обробки: зміцнення за схемою кочення робочого інструмента (рисунк 2.12, а) і зміцнення за схемою ковзання (рисунк 2.12, б). Останню схему значно рідше використовують на практиці, тому що тертя ковзання в зоні контакту призводить до великих теплових процесів, а сам інструмент інтенсивно зношується. Однак якщо оцінити ці дві схеми зміцнення з точки зору механіки процесу і можливості деформаційного спотворення мікроструктури, то обробка за схемою ковзання повинна бути більш ефективною.

Технічна ідея по інтенсифікації напруженого стану в осередку деформації полягає в зміні кінематики робочого інструмента, яка підсилює спотворення зерен структури матеріалу. Пропонується обертати деформуючий ролик не відносно горизонтальної осі, а щодо вертикальної (рисунк 2.12, в). В цьому випадку пластичний відбиток від ролика на поверхні деталі являє собою фігуру у вигляді еліпса, що має велику і малу осі. При обертанні ролика навколо вертикальної осі у-у відбувається накладення пластичних полів різних орієнтацій у напрямку, що має сприяти «перемішування» структури в поверхневому шарі. Якщо поєднати два ролика разом і обертати їх також щодо осі у-у (рисунк 2.12, г), то ефективність обробки буде значно вище, так як в процесі деформування бере участь не два, а чотири вогнища деформації на кожен оборот ролика. На рис. 7 показано вплив схем деформування на максимальне еквівалентну залишкову напругу і компоненти максимального залишкової напруги зразка. При ППД коченням (просте обкатування) відбувається мінімальне спотворення структури. За умови ППД ковзанням виникає велике тертя, яке призводить до підвищення інтенсивності напруги в зоні деформації. При ППД з обертанням ролика щодо своєї діаметральної осі (у-у) за рахунок різних розмірів вогнищ деформації напруги посилюються. Ефективний результат отриманий при



ППД з обертанням двох роликів щодо осі (у-у). В результаті описаної конструкції профілю робочої частини двох радіусного обкатані ролика метал поверхневого шару деталі при обробці знаходиться в умовах складного напруженого стану, відчуває пластичну деформацію з накопиченням великої кількості спотворень.

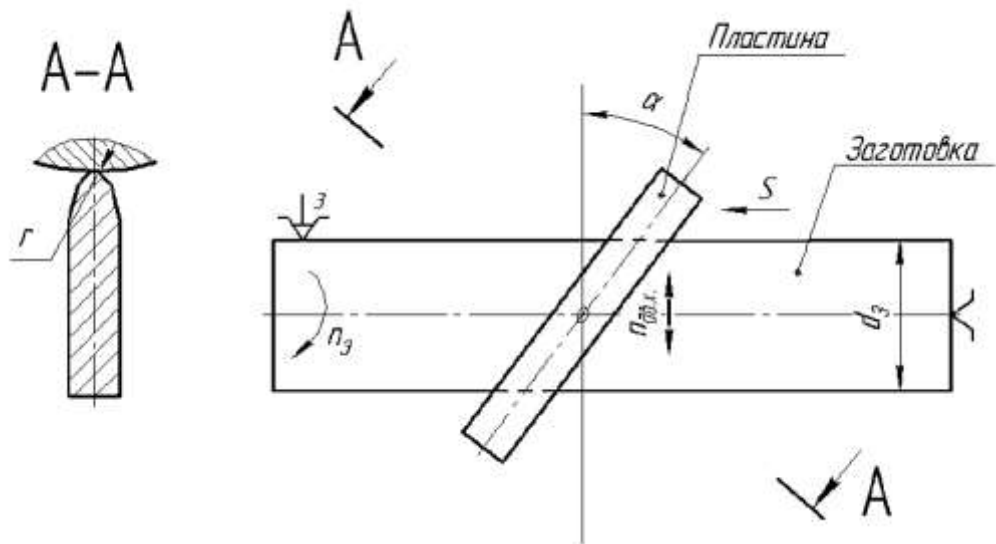


Рисунок 2.11.- Схема процесу осцилюючого вигладжування циліндричних деталей.

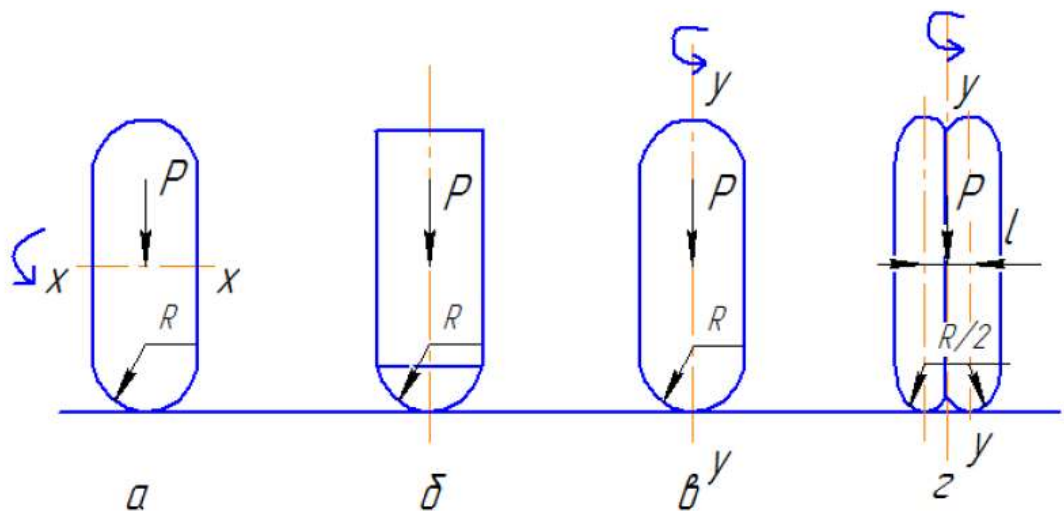


Рисунок 2.12.- Схеми навантаження при різних умовах контакту з оброблюваної поверхнею (X-x, у-у: осі обертання)

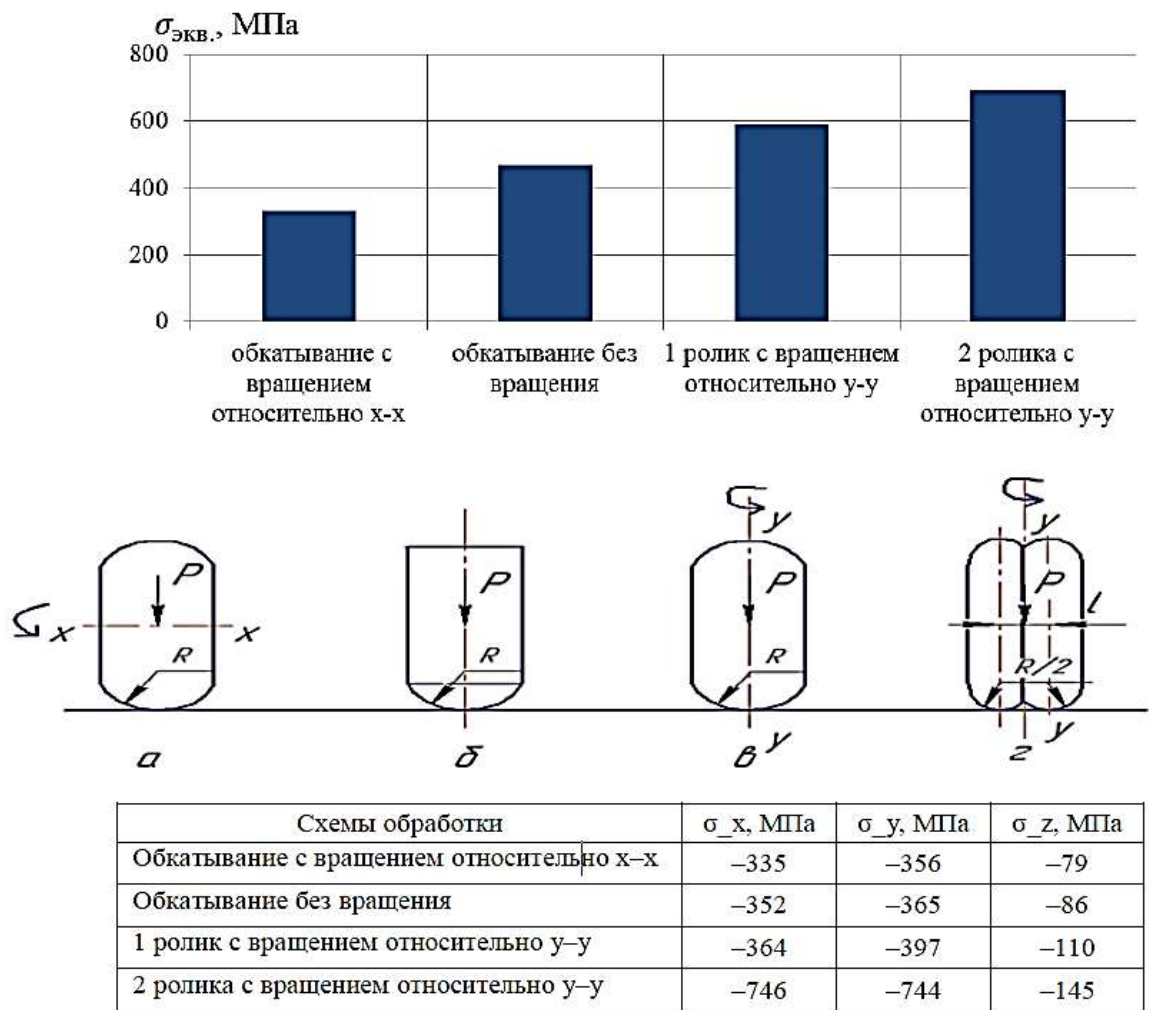


Рисунок 2.13.- Вплив схем деформування на максимальні значення еквівалентних залишкових напруг (а) і компонент максимальних залишкових напружень зразка (б)

Умова контакту і характер взаємодії деформуючого інструменту з деталлю в процесі обробки дуже впливає на перерозподіл матеріалу поверхневого шару. Виявлено, що основними чинниками, що впливають на напружено-деформований стан деталей, є геометрія, форма, взаємне розташування елементів деформуючого інструменту і їх кінематика щодо оброблюваної деталі.

Як висновок, для обробно-зміцнюючої обробки деталей малої жорсткості розроблені нові технологічні процеси поверхневого пластичного деформування. В основі зміцнюючих процесів використані традиційні схеми обробки металів тиском - калібрування і поперечна прокатка. Нові процеси

локального зміцнення деталей машин побудовані на зміні кінематики обробки - відцентрове зміцнення і зміцнення роликком зі зміненою кінематикою обертання. Розрахункові дані і експериментальні дослідження показали досить високу ефективність нових способів обробно зміцнюючої обробки.

## **2.4 Поверхнєве зміцнення виробів складної форми з використанням комплексних схем деформування.**

У роботі ми розраховували, що за умови реалізації чистого зсуву матеріал може накопичувати велику деформацію, зберігаючи макророзміри у всіх трьох напрямках. На жаль, брак простої схеми чистого зсуву полягає в тому, що її важко реалізувати через неможливість жорсткого закріплення зразка торцевими захватами. На практиці ця проблема вирішується використанням спеціальних схем деформування: рівно-канально-кутового пресування або екструзії з крученням. Визнаючи безперечну прогресивність цих розробок, слід все ж відзначити обмеженість їх практичного застосування через малі розміри зразків і складності застосовуваного обладнання. Методи поверхневої деформаційної обробки в останні роки викликають підвищений інтерес. Серед них найбільш відомі ударна і ультразвукова обробки поверхні, поверхнєве тертя, метод волочіння зі зрушенням та інші. З точки зору практичного застосування в цьому ряду особливе місце займають технології поверхневого деформування виробів складної форми, розроблені в Інституті надтвердих матеріалів НАН України. Це методи асиметричного пластичного деформування: деформуюче протягування отворів (рисунок. 2.14, а); редукування циліндрів (рисунок 2.14, б) і накочення сферичних виробів плоскими поверхнями (рисунок 2.14, в). Дані технології дозволяють отримувати вироби з надзвичайно високою точністю геометричних розмірів, унікально малою шорсткістю поверхні і в той же час з нанодисперсних структурою матеріалу в приповерхневих шарах за рахунок реалізації інтенсивної здвигової деформації.

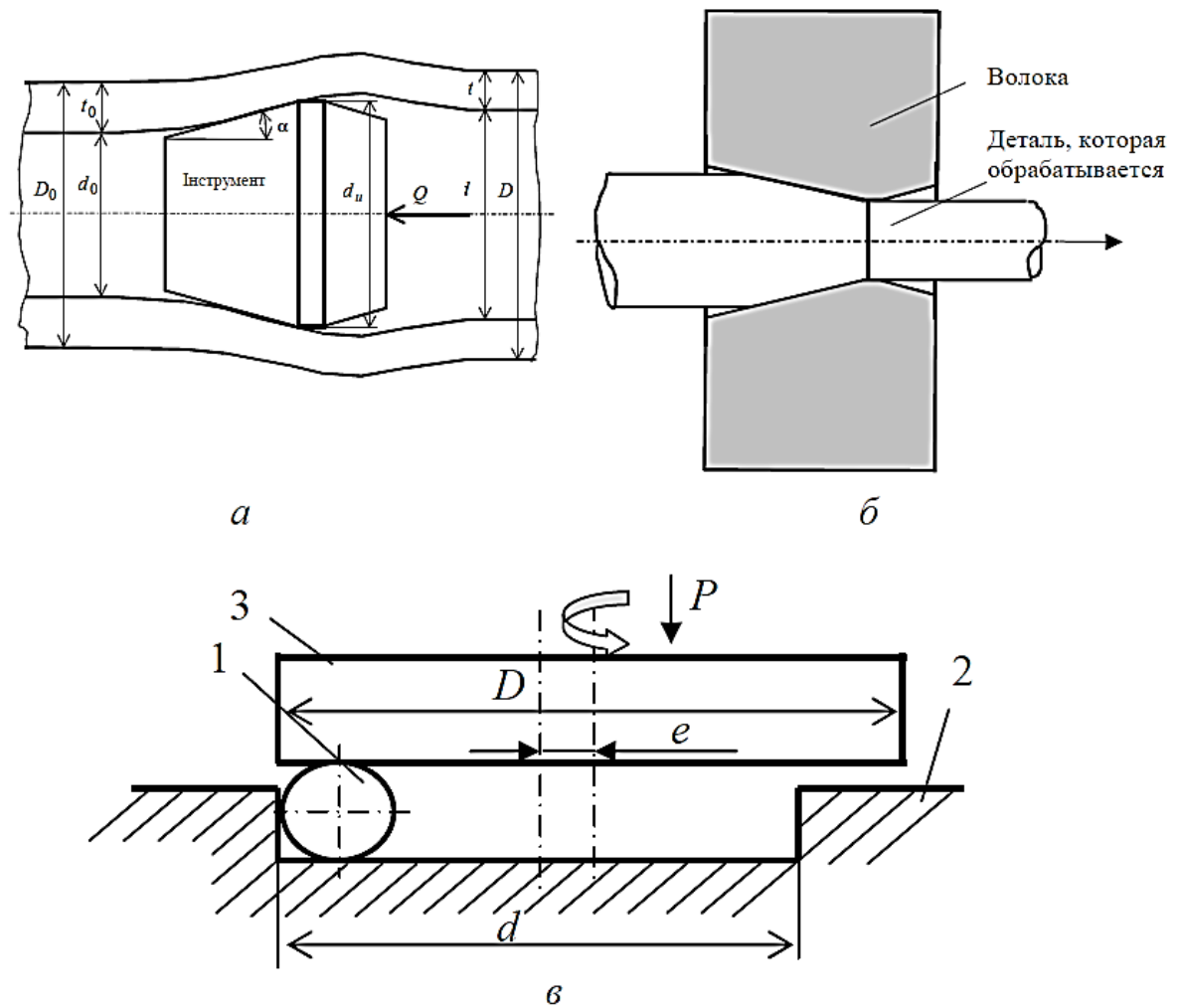


Рисунок 2.14.- Схеми процесів поверхневої обробки: деформуюче протягування (а), редукування (б) і наочення (в).

Найбільш простий і показовий приклад - реалізація протягування з одночасним прокручуванням заготовки. На рисунку 2.15 представлені результати експериментів, продеформованих за схемою, представленій на рис. 1, а. В одному з експериментів протягування здійснювали одночасно з прокручуванням. Додаткове прокручування дозволяє значно підвищити твердість приповерхневих шарів. Порівняння отриманих даних з результатами, отриманими на зразках без прокручування, показало, що прокручування підвищує ефективну деформацію з 0,6 до 1,1, а межа плинності в приповерхневої зоні - з 900 до 1200 МПа.

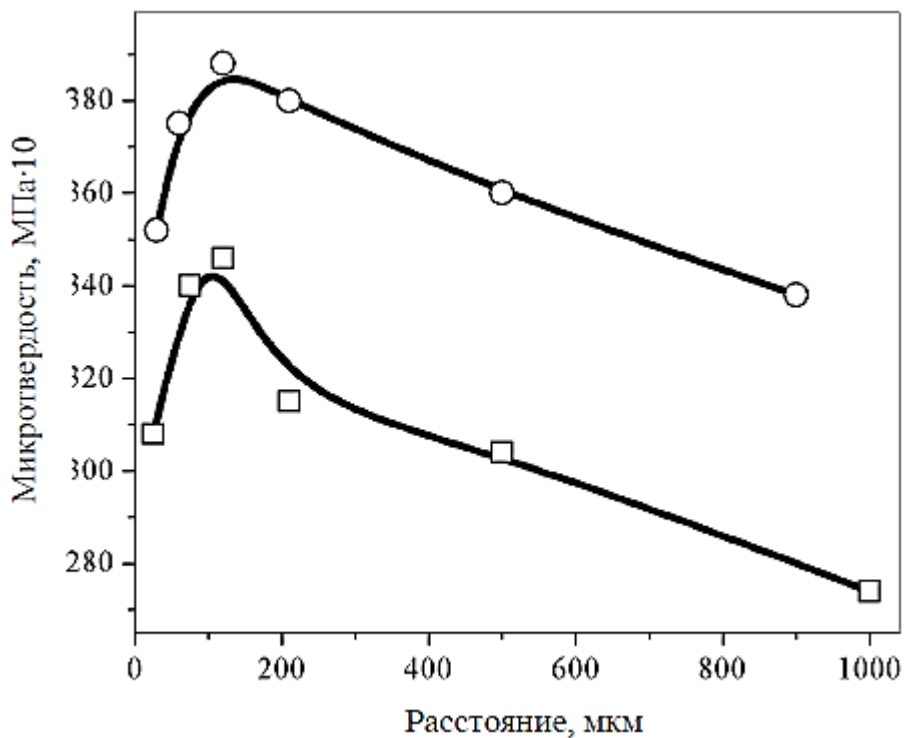


Рисунок 2.15.- Твердість поверхневого шару зразків сталі 35ХГСА після протягування (□) і протягування з прокручуванням (○).

Іншим прикладом комбінованого навантаження є накочення сферичних виробів плоскими поверхнями (рисунок 2.14, в). Для його реалізації сферичний зразок 1 поміщають в циліндричну камеру 2. Обробку здійснюють обертовим інструментом 3, який притискається до заготівлі з деяким зусиллям. Щоб контакт сферичного виробу з інструментом послідовно охопив всю поверхню, вісь інструменту необхідно мати у своєму розпорядженні відносно осі камери з деяким ексцентриситетом  $e$ . При кожному наступному обороті виробу в камері відбувається зміщення сліду контакту щодо попереднього положення. Для дослідження структури і механічних властивостей деформовані кулі розрізали по діаметру на дві рівні половини.

Мікротвердість градієнтного приповерхневого шару вимірювали на приладі ПМТ-3 при навантаженні 20 м. Вимірювання проводили вздовж діаметра кулі з кроком 20 мкм. Структуру деформованих шарів вивчали методом трансмісійної електронної мікроскопії. Для дослідження структури

приповерхневих шарів використовували односторонню полірування.

Графіки зміни твердості по перетину зразків з титанових сплавів ВТ-6 і ВТ-1,0 представлені на рис. 3. Видно, що твердість кулі з технічно чистого титану в приповерхневих шарах перевищує твердість титану, продеформованого методом ВПС (3200 МПа) і досягає 3800 МПа. При цьому деформований шар має досить велику глибину, оскільки підвищена твердість зберігається на глибину  $>1$  мм. Сплав ВТ-6 демонструє більш високу поверхневу твердість (до 5200 МПа), проте знеміцнення відбувається трохи швидше. На електронно-мікроскопічному знімку (рисунок 2.17) поверхневого шару кулі сплаву ВТ-1,0, обробленого накаткою, спостерігаються разорієнтовані нанозерна розміром 150-200 нм.

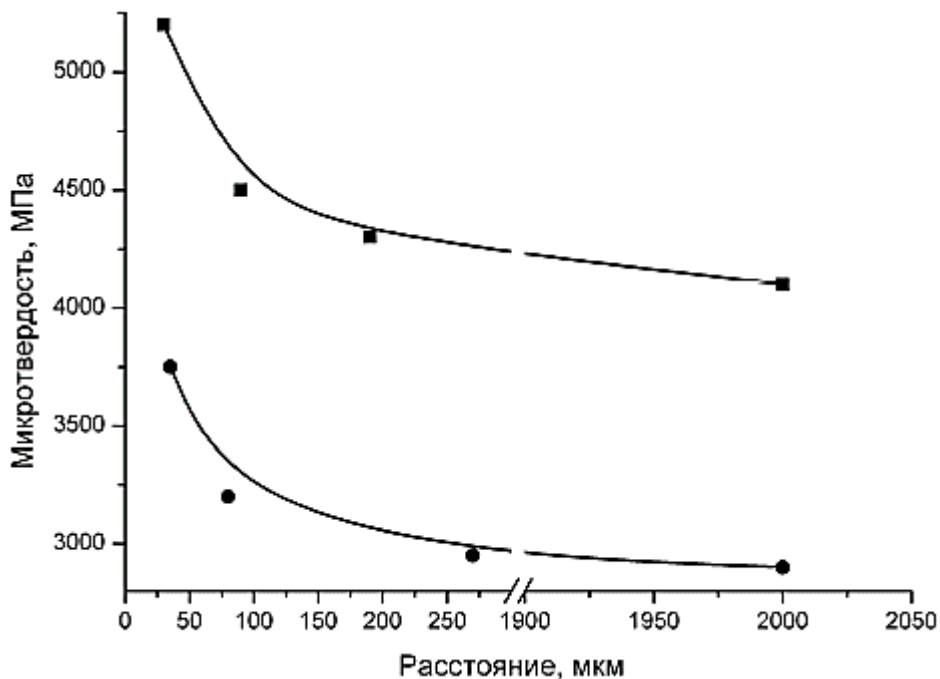


Рисунок 2.16.- Зміна твердості в глибину від поверхні куль з титанових сплавів ВТ-6 (■) і ВТ-1,0 (●), підданих асиметричною накатці.

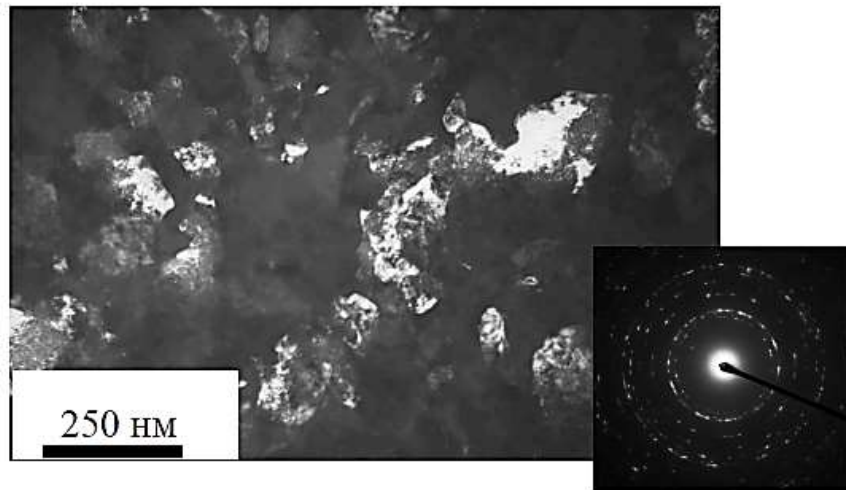


Рисунок 2.17.- Електронна мікроскопія приповерхневого шару кулі зі сплаву ВТ-1.0, обробленого накаткою.

Для дослідження впливу температури накатки на закономірності зміцнення куль проведено порівняльні експерименти на кулях зі сталі 20, продеформованих при кімнатній температурі і 77 К. Результати експериментів представлені на рис. 5. Зразок, продеформований при кімнатній температурі, демонструє помітне зміцнення і, як і в разі титану технічної чистоти, в поверхневих шарах зміцнюється до твердості, відповідної сильно деформованому стану. Потім зміцнення поступово знижується на 1-1,5 мм в глиб зразка. Зразок, продеформований в середовищі рідкого азоту, демонструє аномально високу зміцнення. Зафіксована в приповерхневих шарах твердість 4500 МПа приблизно в півтора рази вищою за твердість сильно деформованої сталі 20. Відзначимо, що навіть високоміцні чавуни, оброблені накаткою при кімнатній температурі, дещо поступаються за зміцнення виробів, отриманим при обробці сталі в хладогенту. Таке сильне зміцнення може бути викликано особливими умовами освіти деформаційної наноструктури. При низьких температурах рух дислокацій гальмується високою напругою Пайерлса, що сприяє виникненню нанозерен малого розміру і, як наслідок, сильному деформаційному зміцнення. Слід враховувати, що при заданому тиску на інструмент (2000 Н) глибина деформованого шару виявляється порівняно невеликий (200 мкм).

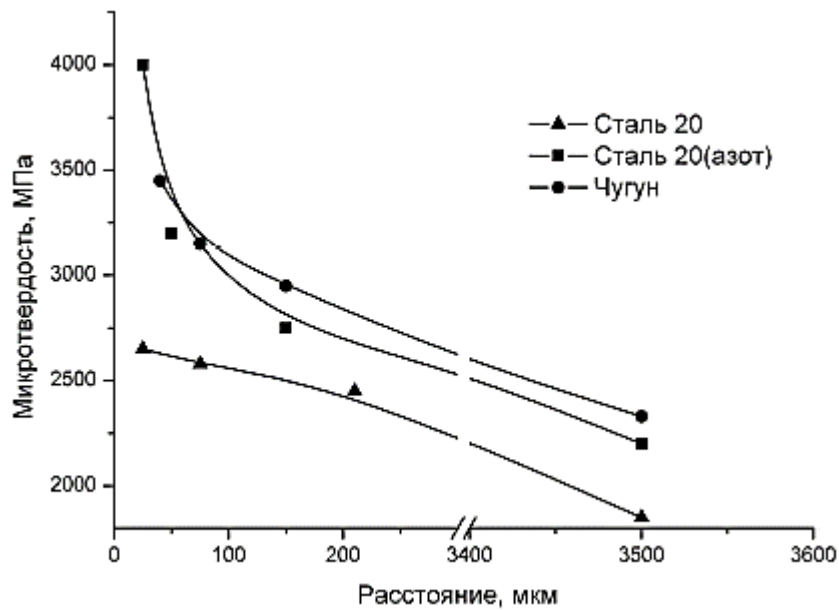


Рисунок 2.18.- Зміна твердості в глибину від поверхні куля зі сплавів заліза, продеформованих асиметричною накаткою при 77 (▲ - сталь 20) і 293 К (■ -сталь 20 (азот); ● - чавун).

Ще одним важливим прикладом практичного використання інтенсивної поверхневої пластичної деформації є розроблена в ІСМ НАН України промислову технологію виготовлення шліцьових втулок для залізничного транспорту. У даній технології застосований метод скорочення на рухомій фасонній оправці.

Шліцьова поверхня втулки (рис. 2.18) зі сталі 20Х формується при використанні комплексної схеми деформування, що поєднує редукування (обтиснення) зовнішньої поверхні заготовки спеціальними волоками з одночасним втискуванням внутрішньої поверхні в профільну оправлення.



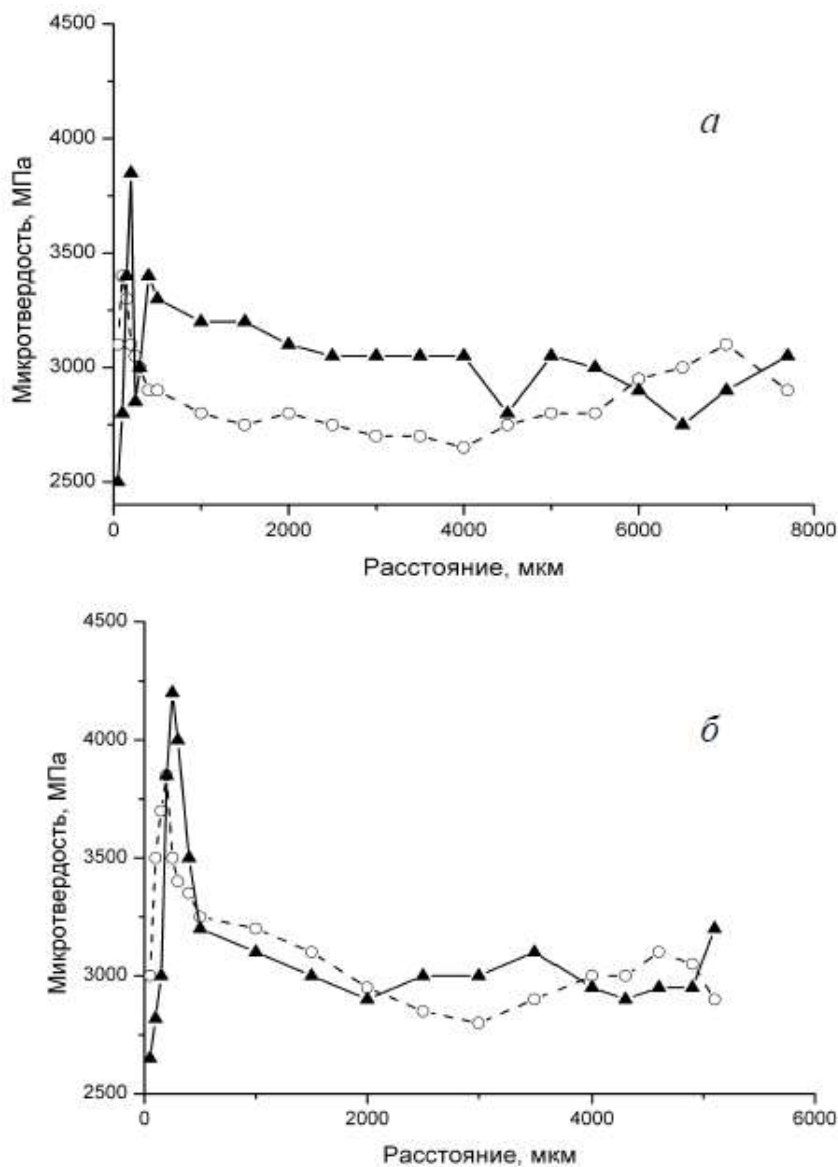


Рисунок 2.19.- Твердість від внутрішньої поверхні шліцьовій втулки: в області шліцьового виступу (а) і шліцьовій западини (б): ▲ - площина, перпендикулярна осі втулки; ○ - площину, розташована уздовж осі шліца.

Формування повного шліцьового профілю відбувається не менше ніж за три цикли деформування, причому внутрішній діаметр подальшої волоки менше діаметра попередньої. В результаті в робочій зоні виробу - шліцьовому профілі створюється наноструктура деформаційного походження і градієнтне зміцнення з досить глибокої деформаційної опрацюванням деталі. Результати вимірювання твердості представлені на рис. 7 для області шліцьового виступу (рисунок 2.19, а) і шліцьовій западини (рисунок 2.19, б). Досліджено зміну твердості в глибину від поверхні для площині,

перпендикулярній осі втулки, і для площини, розташованої уздовж осі шліца. Максимальна твердість спостерігається поблизу поверхні западини на відстані  $\sim 500$  мкм. Звертають на себе увагу надзвичайно високі значення твердості в приповерхневих шарах (понад 4000 МПа), що відповідає великій мірі інтенсивної деформації ( $e \sim 2-3$ ) і великій глибині опрацювання деформаційної субструктури завдяки об'ємному обтисненню на 15-20%. При цьому твердість в лоскоті, перпендикулярній осі втулки, помітно вище, ніж в поздовжньому напрямку. Це пояснюється великим обтисненням ділянок поблизу западини і зменшенням розмірів структурних елементів в напрямку обтиснення. Отримані результати свідчать про доцільність заміни складних операцій точіння і різання з подальшою хіміко-термічною обробкою на більш просте деформування холодним пластичним протягуванням, де процес формоутворення супроводжується зміцненням внутрішніх шліцьових поверхонь за рахунок створення деформаційної наноструктури.

## **2.5 Залежність властивостей деталі від параметрів процесу ППД**

Важливою задачею при обробленні деталей є покращення фізичних і механічних характеристик поверхневого шару та забезпечення високої якості робочих поверхонь і їх матеріалу. ППД має високі показники економічності та дозволяє реалізовувати потенційні властивості матеріалів в реальних деталях з концентраторами напружень або в деталях складної будови.

ППД достатньо розповсюджений по усіх виробництвах і ефективний спосіб підвищення характеристик деталей машин, який зазвичай застосовується, як кінцева операція, яку розвивають багато вчених відкриваючи нові методи або вдосконалюючи існуючі.

Найбільш вагомий ефект зміцнення від оброблення за допомогою ППД досягається для деталей що мають циклічне навантаження, експлуатаційні або конструктивні концентратори напружень. Пластичне деформування ефективне також до тих деталей, що під час експлуатації піддаються зношуванню.

Завдяки зміцненню поверхневих шарів при ППД вдається покращити фізико-механічні властивості деталі внаслідок подрібнення зерен, структурних перетворень, а також формується залишкові напружки стиску в поверхневому шарі, які виникають завдяки розвитку зсувів кристалічної ґратки. Ці спільні фактори і визначають експлуатаційні властивості деталей. Попри те, відбувається зменшення висоти нерівностей, що проявляється в більш похилій їх конфігурації та покращує якість поверхні, що важливо для поверхонь пар тертя. Залежно від вимог, форми, матеріалу деталі, розмірів, що спрямовуються до якості поверхні та геометричних параметрів, виробничих або інших умов можна застосувати різні способи оброблювання пластичним деформуванням. Методи можна відрізнити за схемами силової дії на деталь, економічністю, продуктивністю, та іншими показниками (рисунок 2.20). Спільними ознаками для методів є форма робочої ділянки деформуючого тіла; схема контактування поверхні деталі з деформуючими тілами; швидкість деформування; зв'язок оброблюваних деталей з джерелом руху спосіб передачі енергії до інструмента.

Обкочування деталей роликами є одним з розповсюджених способів ППД. Також широкого використання зазнали зміцнення карбуванням, зміцнення дробеструйним і відцентрово-кульковим наклепом, обкочування пружними кульками. Останнім часом термомеханічна обробка також набуває поширеності при обробленні.

При обкочуванні деформування деталі починається з втискання ролика в поверхню оброблюваної деталі. Контакт ролика з деталлю може бути лінійним або точковим в залежності від конфігурації контактуючих тіл. Ролик вдавлюється в деталь дією прикладеної сили, утворюючи при цьому на поверхні відбиток. Форма утвореного відбитку впливає безпосередньо на процес пластичної деформації при обкочуванні.

При обкочуванні роликом кругового профілю деталі довільної форми утворюється відбиток еліптичної форми, за умови, якщо радіус кривизни деталі не дорівнює радіусові кривизни ролику, узятому з протилежним

знаком. Ролики виготовлені у формі сфери, тора або бочки (з робочим профілем, обкресленим в перерізі по колу) мають переваги над іншою формою, що забезпечує широке застосування у виробництві. При використанні таких роликів форма відбитку є постійною та зберігається незалежно від точності його установки та жорсткості системи інструмент-деталь. Кругло профільні ролики зазнали широкого використання при чистових обкочуваннях і використовуються як основний інструмент для зміцнення. При лінійному вихідному контакті деталі та ролика створюється прямокутний відбиток.

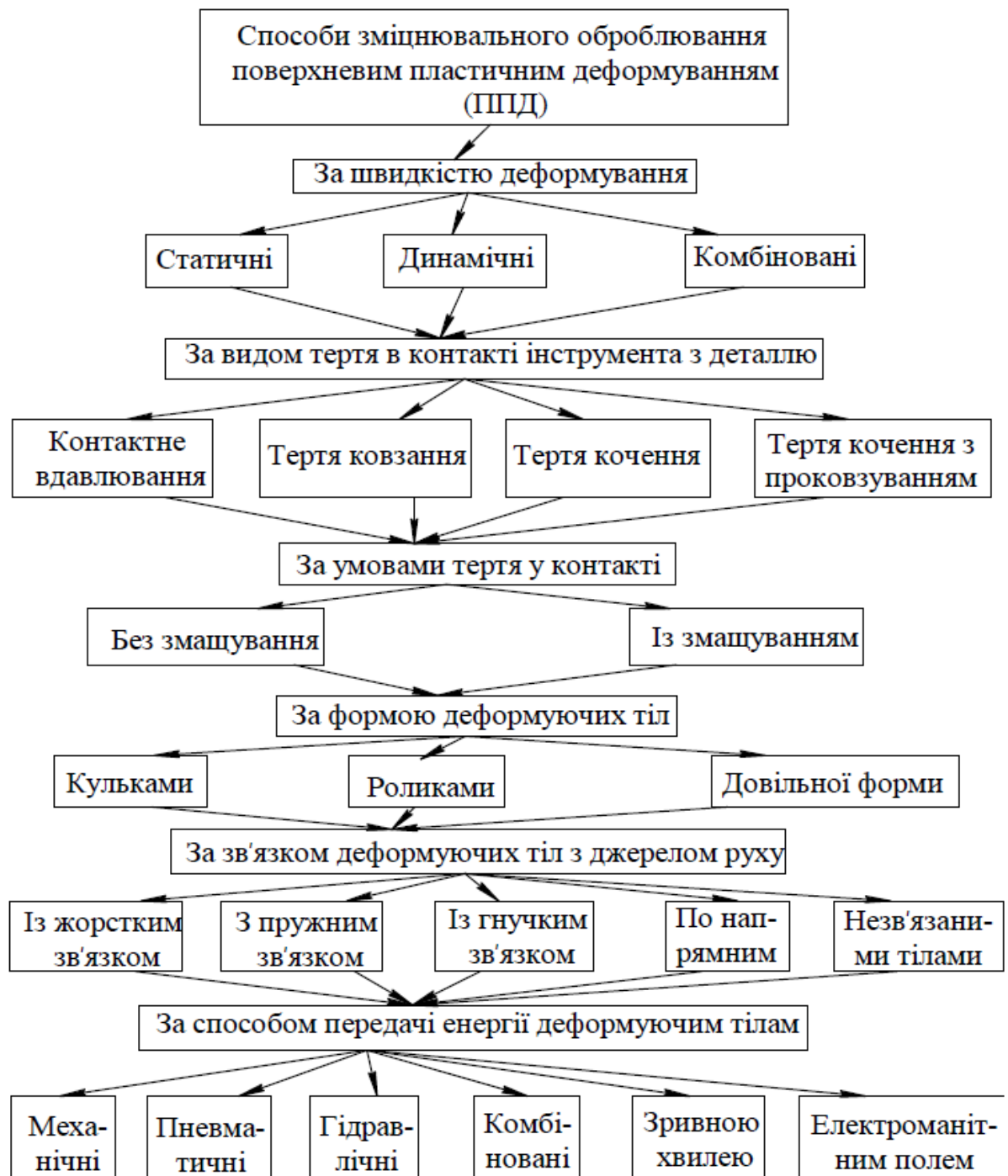


Рисунок 2.20. - Класифікація способів ППД

## 2.6 Вплив ППД та параметрів оброблення на технологічну спадковість деталі

Застосування ППД впливає на зміни характеристик пластичності і міцності матеріалу, зростають залишкові стискаючі напруження і твердість, змінюється текстура і структура матеріалу деталі. Проте цілеспрямовано по впливати на ці зміни або спрогнозувати задані умовами експлуатації якісні

характеристики поверхневого шару у деяких випадках не має можливості через не стаціонарність процесів ППД та їх складність, та їх недостатню вивченість.

Через складність впливу різних параметрів оброблення на зміцнення поверхневого шару для впровадження процесів ППД та отримання необхідних характеристик виробу є потреба у трудомістких експериментах. Результати цих експериментів, головним чином, впливають тільки на певні характеристики для конкретних виробів з конкретного матеріалу.

Узагальнюючими характеристиками, для формування експлуатаційних властивостей виробів, є характеристики пластичності і міцності матеріалу, та рівень залишкових напружень в поверхневому шарі деталі, обробленої методом ППД. Важливою для оброблення є дані величини і характер розподілу накопиченої деформації в поверхневому шарі та залишкового ресурсу пластичності. За вказаними характеристики можна визначити здатність матеріалу деталі піддаватися подальшій пластичній деформації.

Разом із зміцненням, у поверхневому шарі відбувається процес розміцнення металу, який викликаний ефектом Баушінгера, спричинений зміною знаку деформації. Найбільш інтенсивне розміцнення можна спостерігати при перенаклепі або при великому накопиченні пошкоджень на поверхні, що у подальшому призводить до помітного зниження міцності і твердості оброблюваного металу. За цих умов, до головних факторів зменшення твердості можна віднести:

- а) ефект Баушінгера, сутність якого деформаціях з зміною знаку - посилюється разом із зростанням пластичної хвилі, а отже, і з ростом глибини впровадження;

- б) контактного тертя і, як наслідок, підвищення температури в зоні контакту;

- в) вичерпання ресурсу пластичності через перенаклеп металу.

Як результат, за умови тривалого пластичного зміцнення вимірювання твердості не можливості визначити ступінь деформації зміцненого шару. В

таких випадках твердість можна характеризувати спираючись на властивості міцності металу, та додатково пов'язувати з залишковими напруженнями. За умови, якщо необхідно визначення ступеню деформації, що був накопичений за певний час деформування або число проходів, використовуючи спосіб вимірювання твердості, її необхідно визначати за обмежене число проходів або часу обробки. Ступінь деформації, що накопичена за процес обробки можна визначати як сумарну по проходах або часу обробки при цьому ураховуючи поетапне зменшення внаслідок зміцнення металу.

На певному етапі ППД можна спостерігати інтенсивне пластичне розпушення матеріалу що супроводжується падінням твердості поверхні деталі (рисунок 2.21)

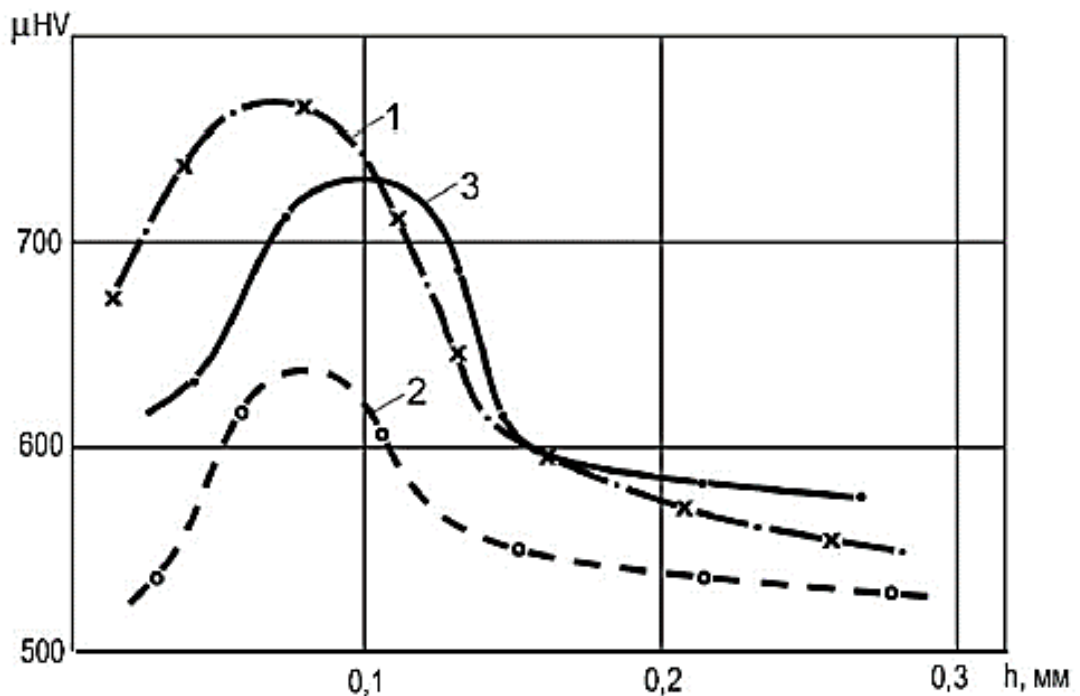


Рисунок 2.21. – Розподіл мікротвердості по усіх глибині поверхневого шару при методі обкочуванні шариками свідчить про негативний вплив у подальшому процесу пластичного деформування на характеристики поверхневого шару деталі (рисунок 2.21, крива 2).

По даних на рисунку 2.21, найбільше значення інтенсивності деформацій, для утворених кривих 1 і 3, можна спостерігати на глибині

0,1мм. Накопичену деформацію отримати за результатами кривої 2 немає можливості.

Виходячи з цього, виміри твердості поверхні можна використовувати для визначення характеристик матеріалу поверхневого шару деталі на перших стадіях процесу пластичного деформування та для визначення факторів зміщення області максимальних деформацій, а також для визначення критерію, що характеризує процес обробки заготовки по моменту падіння твердості поверхневого зміцненого шару. Як показують дослідження поверхневого шару - всі способи ППД під час оброблення створюють на поверхні заготовки остаточні напруження стиску, що відрізняються за глибиною розповсюдження і величиною, та на глибині здатні переходити в розтягуючі остаточні напруження (рисунок. 2.22).

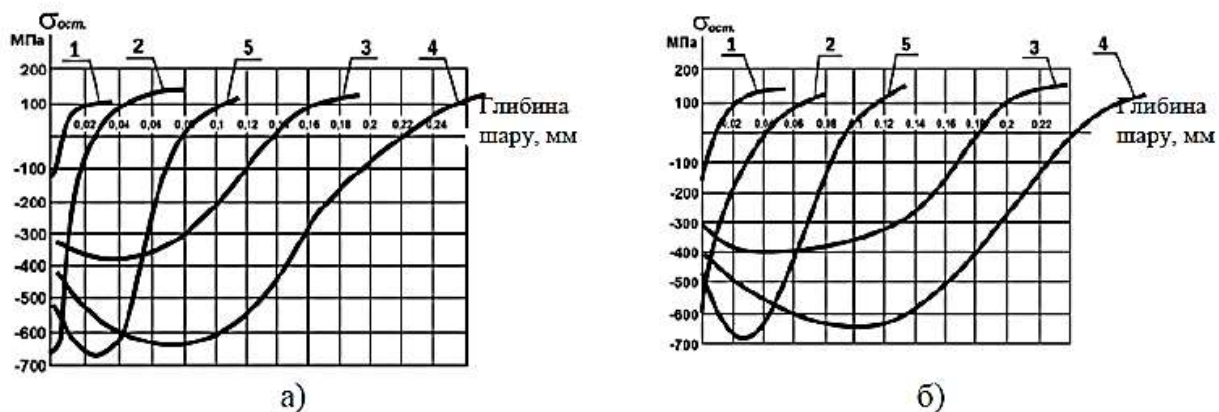
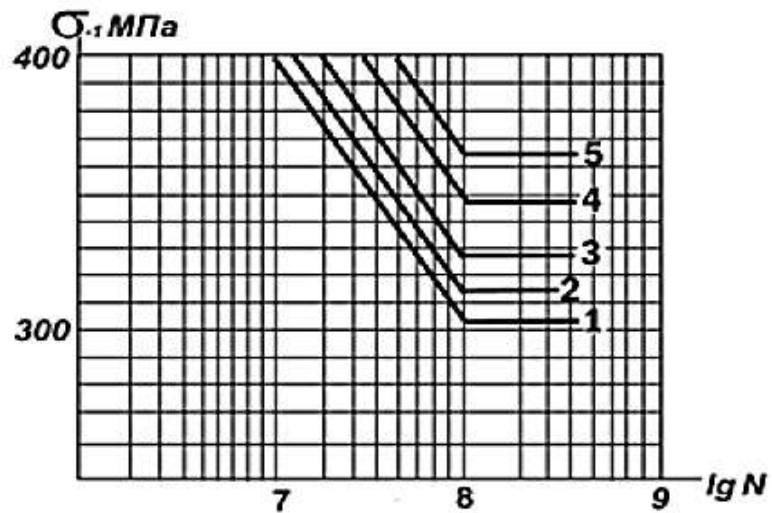


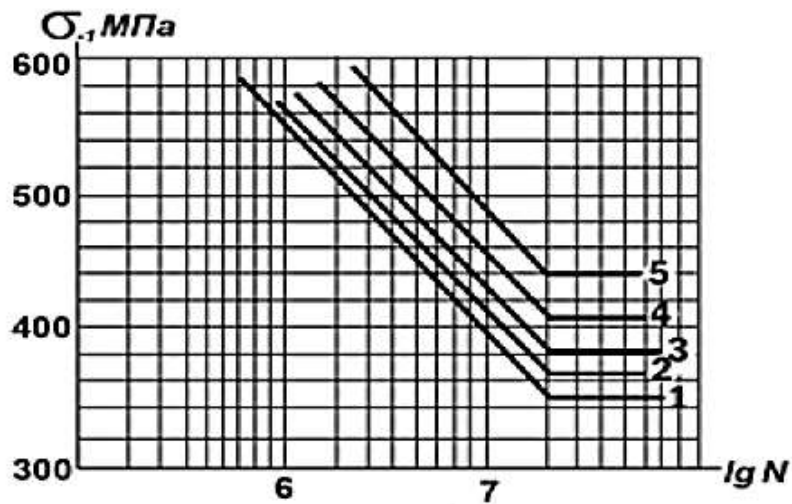
Рисунок 2.22.– Графік розподілу остаточних напружень в поверхневому шарі при різних видах фінішної обробки: 1 термообробка; 2 – віброгалтовка стальними кульками; 3 – ультразвукове зміцнення стальними кульками діаметром; 4 – гідродробоструменеве зміцнення кульками; 5 – дробоструменеве зміцнення стальними кульками.

За результати випробувань деталей на втому після зміцнення методами пластичного деформування, як правило, спостерігається підвищення межі витривалості (рисунок 2.23), але прямий зв'язок з глибиною і величиною поширення залишкових напружень стиску відсутній.





а)



б)

Рисунок 2.23 – Графік кривих втомної міцності деталей при різних видах фінішної обробки: 1 - термообробка; 2 – віброгалтовка; 3 – ультразвукове зміцнення; 4 – гідродробоструменеве зміцнення кульками; 5 – дробоструменеве зміцнення стальними кульками.

ППД призводить до помітного підвищення характеристик конструктивної міцності і твердості деталей машин, що виготовлені із кольорових металів та сплавів, сталей, чавуну; контактної витривалості, втомлювальної міцності, корозійної стійкості, контактної жорсткості, зносостійкості та ряду інших механічних характеристик.

Велику ефективність має застосування обробки пластичним

деформуванням деталей що мають різноманітні концентратори напружень. Підвищення границь витривалості за умови багато циклової втомлюваності підвищуються настільки, наскільки більша концентрація напружень. У цьому випадку пластичне деформування, як метод обробки націлений на зміцнення має перевагу якщо порівнювати його з хіміко-термічними і термічними методами. В таблиці 1.1 наведені результати дослідження за умови мало циклової втомлюваності гладеньких деталей на базі проведення 8-10 цикл / хв. Пластичне деформування дає значне підвищення довговічності якщо порівнювати з обробленням шліфуванням, досягаючи найбільшого підвищення довговічності від 3 до 7,5 разів при обкочуванні роликком.

Таблиця 2.1 – Показники довговічності зразків в залежності від методу обробки та оброблюваного матеріалу

Спосіб обробки	Число циклів до руйнування при $\sigma_{max}$				
	1360 МПа			1000 МПа	
	30ХГСА	08Х17Т	ВКС2Ю	ВНС5	ВНС2
1	2	3	4	5	6
Шліфування	7400	6900	7400	20750	19280
Віброшліфування	19100	19700	30000	-	53650
Вібронаклеп	21000	20300	22800	96300	105100
Обдування дробом	24000	22300	-	76300	-
Пневмодинамічний наклеп	-	35500	48400	88700	-
Обкатка роликком	24500	42000	>1000000	44000	150000
Алмазне вигладжування	-	-	35161	180000	-
Обдування металічним піском	12500	11200	21000	70000	85040
Обдування кварцовим піском	-	-	-	-	48500

## 2.7 Напружено – деформований стан поверхневого шару при обкочуванні заготовки роликом

Контур залишкових вм'ятин на поверхні деталей в загальному випадку обмежений залишковою кривою, що має в плані еліптичну форму з великою  $a$ , і малою  $b$ , піввісями. Важливими характеристиками для деформованого стану матеріалу в контакті є саме геометричні параметри залишкової вм'ятини. При обкочуванні будь-яких деталей роликом один із розмірів створеного «відбитку» наближений до ширини бігової дорожки робочого інструменту що в свою чергу впливає на протікання процесу хвилеутворення на поверхні що оброблюється та практично визначає утворений мікрорельєф. За допомогою розмірів напіввісі інструменту  $a$  і  $b$ , в свою чергу можна характеризувати глибину пластично-деформованої зони в області контакту з інструментом.

В роботі наведені формули що дозволяють розраховувати розміри великої  $a$ , і малої  $b$  та напіввісі еліпса (рисунок 2.24.)

$$a = \sqrt{R_{11} \cdot (2 \cdot h_a + a_y) - h_a^2}$$

$$b = \sqrt{R_{21} \cdot (2 \cdot h_b + a_y) - h_b^2}$$

де  $R_{11}$ ,  $R_{21}$  - радіус кривизни робочої поверхні обкочуючого ролика (для кульки  $R_{11} = R_{21}$ );  $2a$  і  $2b$  – мала і велика осі контуру (у плані) вм'ятини що утворилась;  $h_a$  і  $h_b$  - відстані, що відраховані вздовж дії сили  $P$ , від рівня  $O$  що є центром залишкової вм'ятини по відношенню до найбільш віддаленої від нього точок контуру еліптичної площадки контакту, не враховуючи при цьому наклеп;

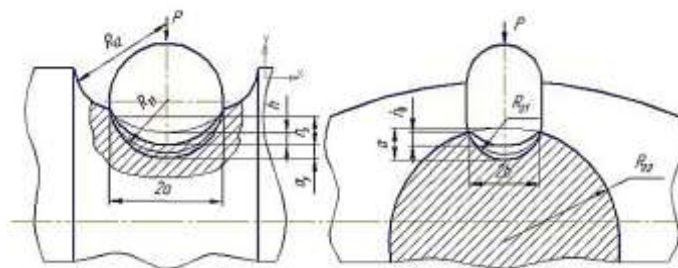


Рисунок 2.24. – Схема пластичного контакту тіл що мають довільну кривизну

З двох складових складається повне зближення при пружно-пластичному контакті заготовок із інструментом: рівного глибини відновленої вм'ятини, пружного зближення і залишкового зближення  $h$ , яке зникає після зниження навантаження що є наслідком зникнення пружної деформація інструменту і деталі таким чином:

$$a = h + a_y$$

В роботі для розрахунку  $a_y$  маємо наступну формулу:

$$a_y = \frac{n_{a'}}{2} \cdot \sqrt[3]{\frac{9\pi^2}{4} (k_1 + k_2)^2 \cdot p^2 \cdot \left[ \frac{1}{R_{11}(1 + \frac{2 \cdot h_a}{a_y})} + \frac{1}{R_{21}(1 + \frac{2 \cdot h_b}{a_y})} \right]}$$

Невідомими геометричними параметрами при цьому є геометричні параметри вм'ятини  $a_y$ ,  $h_a$ ,  $h_b$  які можна вираховувати за формулами:

$$h_a = \frac{\pm 2R_{12}h - R_{11}a_y - h^2}{2(\pm R_{12} + R_{11} - h)};$$

$$h_b = \frac{\pm 2R_{22}h - R_{21}a_y - h^2}{2(\pm R_{22} + R_{21} - h)};$$

де знаки «плюс» і «мінус» стосуються випадків контакту інструменту і деталі які мають переріз, що в даній площині обмежений ввігнутим або випуклим контурами. Знак «мінус» отримаємо у тому випадку, коли вм'ятинна обмежується ввігнутою поверхнею.

Аналіз даних показує, що за умови, якщо у формулах не враховувати  $h$  і  $h^2$  - похибка розрахунку  $a_y$  по формулі не має перевищити 3-5%. За цієї умови формули можна записати наступним чином:

$$h_a = \frac{\pm 2R_{12}h - R_{11}a_y}{2(\pm R_{12} + R_{11})};$$

$$h_b = \frac{\pm 2R_{22}h - R_{21}a_y}{2(\pm R_{22} + R_{21})};$$

Як геометричні параметри А і В, що характеризують безпосередньо головні кривизни контактуючих тіл, ми приймаємо меншу і більшу із наступних двох сум відповідно:

$$A = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{R_{11}} \pm \frac{1}{R_{12}} \right);$$

$$B = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{R_{21}} \pm \frac{1}{R_{22}} \right);$$

При цьому:  $\frac{A}{B} \leq 1$

Пружні сталі  $k_1$  і  $k_2$  що враховуються в минулих формулах можна отримати наступним шляхом:

$$k_1 = \frac{1 - \mu_1^2}{\pi \cdot E_1}, k_2 = \frac{1 - \mu_2^2}{\pi \cdot E_2}$$

де  $\mu_1^2, \mu_2^2$  - коефіцієнти Пуассона;  $E_1, E_2$  - модулі пружності матеріалів інструменту і заготовки.

В рівняння після перетворень залишається тільки одна невідома  $a_y$ , яку можна отримати за допомогою методу послідовних наближень. Завдяки цій умові, ми визначили всі величини, що необхідні для розрахунку значень  $a$  і  $b$ .

## 2.8 Ізостатичний метод ППД

Ізостатичним методом пластичного деформування є спосіб оброблення інденторами які розподіляються рівномірно оброблюваній поверхні.

Безпосередньо ізостатичне оброблення характеризується рівномірним розподілом тиску по всьому робочому об'єму, і в такому випадку маючи рівномірні втрати на тертя між інструментом, сферичними інденторами, які після кожного наступного циклу навантаження займають внаслідок перемішування випадкове положення. Під час цього збільшується величина мікротвердості поверхневого шару заготовки, збільшується ступінь зміцнення та зменшується висота мікронерівностей. Додатково, можна припустити, на основі досліджень інженера О.П. Кадоценка, з приводу того, що при дії на поверхню вільних інденторів забезпечення ефекту самозмащування проходитиме в значно сприятливіших умовах протікання процесу, ніж при обробці обкатуванням. Спираючись на те, що пори на оброблюваних поверхнях деталей закриватимуться без «зализування» металу в порожнину пори, тому закриття отвору буде відбуватись рівномірно по

всьому діаметру пори.

Реалізувати описаний спосіб можна за допомогою пристрою, принципову схему якого маємо на рисунку 2.25.

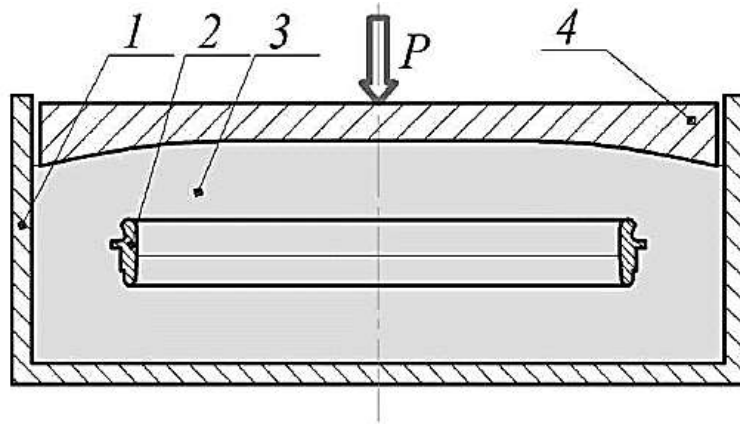


Рисунок 2.25.- Принципова схема пристрою для ізостатичного пластичного деформування: 1 – робоча камера; 2 – деталь; 3 – сферичні індентори; 4 – поршень

У камері 1 розміщується заготовка 2, яка підлягає подальшому обробленню, і сферичні індентори, в нашому випадку кульки 3. Поршень 4 слугує для задання необхідного за умовами зусилля поверхневого пластичного деформування, що позначене на схемі літерою  $P$ . Ізостатичний метод описаний вище ґрунтується на тому, що при створенні зусилля тиском поршнем 4 кульки 3 передають утворений тиск розподіляючи його на всі поверхні, що розміщуються всередині робочої камери 1. На поверхнях заготовки (рисунок 2.26, а, б) у зоні контакту з кульками з'являються осередки деформацій, що рівномірно розподіляються по всій поверхні деталі.

Розподіл осередків деформації рівномірно, в свою чергу дозволяє зменшити деформації оброблюваних деталей та помітно підвищує стабільність геометричної форми поверхонь заготовки (рисунок 2.27).

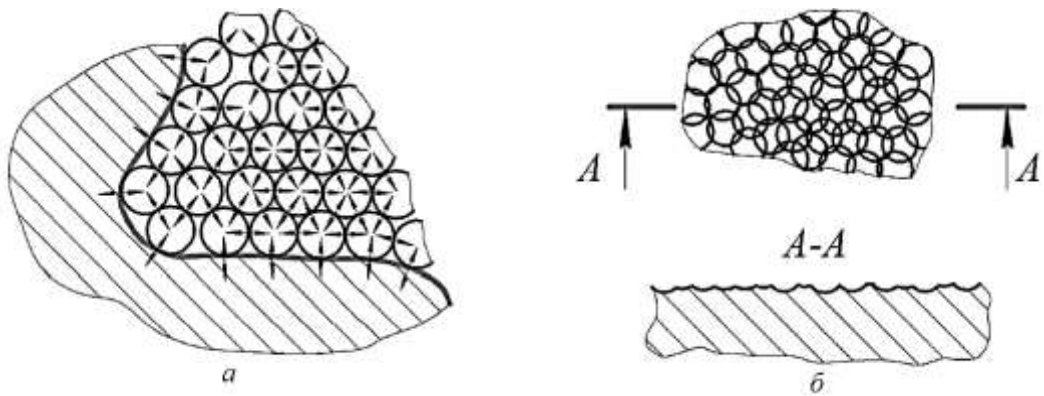


Рисунок 2.26.- Дія сферичних інденторів на поверхню маложорсткої деталі: а – у поперечному перерізі; б – вид збоку

Використовуючи запропонований метод зміцнення для покращення якості оброблюваної поверхні і зменшення тертя між самими кульками в зону деформації можна подавати змащуючо-охолоджуючу рідину, як приклад, гас або мастило.

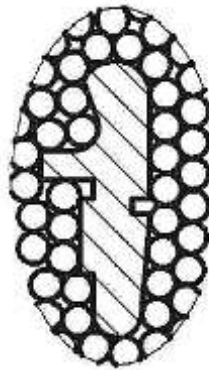


Рисунок 2.27.- Поперечний переріз оброблювальної деталі

Для розподілення силового впливу по всій поверхні оброблюваної деталі та підвищення інтенсивності наклепу можна змінювати положення деформуючих кульок по відношенню до оброблюваної поверхні деталі. Наприклад, це можна здійснювати накладанням обертального руху з певною частотою  $n$  або вібрацій з заданою частотою  $f$  на робочу камеру 1 за умови відсутності тиску  $P$ . За цих умов, під дією сили інерції або впливу вібрації зміщення кульок і оброблюваної заготовки один відносно одного отримаємо різні в силу різних мас деталі по відношенню до кульок. Дане переміщення можна проводити також завдяки перемішуванням кульок у робочій камері 1, або за умови витікання деяких кульок з робочої камери. За цих дій кульки,

які прилегли до оброблюваних поверхонь деталі, будуть спрямовані займати інші положення. Зменшування інтенсивності зміщення кульок відносно оброблюваної поверхні деталі може відбуватися також при ущільненні об'єму кульок за умови прикладання зусилля Р.

Застосування ізостатичного методу поверхневого зміцнення має наступні переваги:

- спосіб можна застосовувати для зміцнення поверхонь будь-якої конфігурації у просторі або в поперечному перерізі;
- режим зміцнення не обмежується жорсткістю конструкції деталі;
- зміцнення за методом не викликає викривлення геометричної форми поверхонь для нежорстких деталей;
- спосіб має широку універсальність і для його реалізації немає необхідності у складному та дорогому обладнанні;
- під час процесу відбувається зміцнення поверхневого шару та закриття пор, але не відбувається «зализування», що є кращим варіантом для забезпечення ефекту самозмашування.

Детальне дослідження ізостатичного ППД потребує побудови математичної моделі цього процесу. За допомогою моделі процесу ізостатичного пластичного деформування можна визначити оптимальні режими проведення оброблення для подальшого отримання регулярного мікрорельєфу поверхонь і необхідних параметрів якості.

Загальновизнаним на даний час є те, що основними чинниками, які мають вплив на показники якості поверхневого шару деталей при обробленні поверхневим пластичним деформуванням (ізостатичним), є зусилля деформації і площа поверхні контакту з деталлю.

Використовуючи математичний пакет MathCAD у роботи побудовано графіки залежності між відношенням площі поверхні деталі, яка підлягає обробленню, та площею, що займають сліди інденторів  $S=F/F_0=f(N)$ , від кількості циклів навантаження N для деталей з малою жорсткістю та з пористих спечених композицій (рисунок 2.28). Графік побудований для трьох



випадків: 1)  $r = 3$  мм; 2)  $r = 4$  мм; 3)  $r = 5$  мм. Для всіх досліджень приймаємо:  $h = 0,3$  мм.

Моделювання топографії оброблюваної поверхні проведено за допомогою математичного пакету MathCAD, графічно показуючи розподілення плям контакту між заготовкою та інденторами залежно від їх кількості, що в свою чергу взаємодіють з оброблюваною поверхнею і циклів навантаження (рисунк 2.29). Для досліджень приймаємо: радіус індентора  $r = 4$  мм. Побудову виконуємо для 1/10 частини робочої поверхні деталі. Механізм розподілення інденторів і утворення топографії поверхні є випадковим.

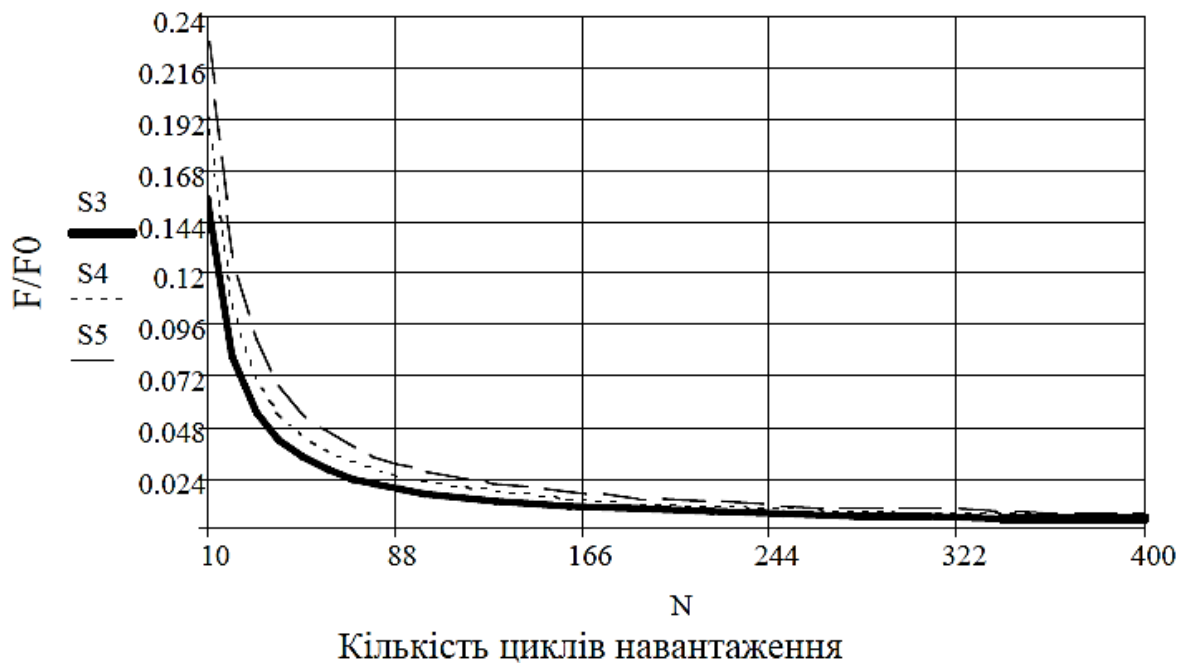


Рисунок 2.28.- Залежність відношення площі оброблюваної поверхні до площі, яку займають сліди інденторів, від кількості циклів навантаження.

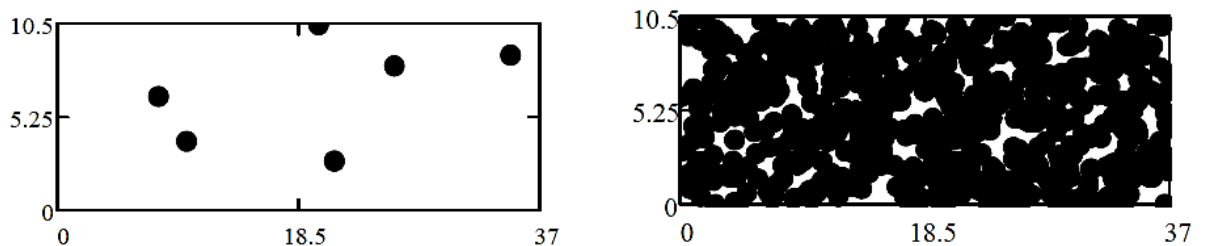


Рисунок 2.29.- Топографія оброблюваної поверхні деталі:  
а – після першого циклу; б – після 100 циклів навантаження

З аналізу графіку на рисунку 2.28 ми отримуємо залежності відношення площі оброблювальної поверхні деталі, до площі, що займають сліди інденторів, від кількості виконаних циклів навантаження. На рисунку 2.29 ми бачимо топографію оброблюваної поверхні, з якої можна зробити висновок, що після виконання 100 циклів навантаження відношення  $F/F_0$  вже не має істотних змін. З чого можна зробити висновок, що вся оброблювана поверхня отриманою деталі покрита слідами інденторів. Додатково подальше оброблення доцільно проводити з ціллю збільшення величини збільшенням ступеню зміцнення, мікротвердості поверхневого шару зразка, зменшенням висоти мікронерівностей.

Ізостатичний метод ППД для маложорстких деталей та пристрої, що розроблені для його реалізації дають змогу отримати виріб високої якості з необхідними функціональними можливостями. Використання цього методу поверхневого деформування помітно підвищує продуктивність ропоряджувально-зміцнюючого оброблення деталей. Найбільшого економічного ефекту можна досягнути за рахунок широкої універсальності такого способу, для його реалізації не потрібно складного або дорогого устаткування, його можна застосовувати для обробки деталей різної конфігурації. Цей спосіб здатний забезпечувати рівномірну якість поверхні на усіх ділянках обробки, а отриманий мікрорельєф сприяє помітно кращому утриманню мастила, що забезпечить зменшення зносу деталей машин.

## **2.9 Метод ППД вигладжування з ультразвуком**

ППД з ультразвуком можна описати ґрунтуючись на використанні реологічних моделей інструментальних матеріалів, які відображають їх пружно пластичні властивості. Заданий підхід дозволяє розкривати механізми впливу ультразвуку на процеси ППД .

Для дослідження процесу ППД з використанням ультразвуку використовували наступні матеріали: сталі 10 (100 HB), 45 (150 HB, 50 HRC), ШХ15 (210 HB, 55 HRC), алюмінієві сплави Д16Т (120 HB), В95 (190 HB).

Інструмент для вигладжування використовувався з наконечником із твердого сплаву ВК15 та радіусом сфери 1, 2, 4 і 6 мм.

Реалізацію режиму імпульсного деформування, та отримання переваг такого режиму забезпечено використанням способу ультразвукового вигладжування. Суть цього методу полягає в тому, що між інструментом 1 та деталлю 2, що зображені на рисунку 2.30, встановлюється попередній зазор  $\delta$ . Інструмент що має вигляд сферичного наконечника, закріплений до концентратора магнітострикційного перетворювача, що задає рух подачі і коливальний рух із певними частотою  $f$  і амплітудою  $\xi$  до оброблюваної поверхні заготовки.

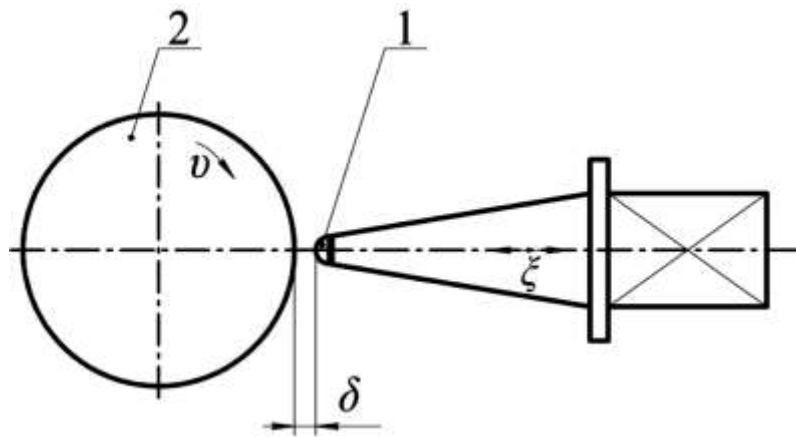


Рисунок 2.30.- Схема ППД з ультразвуком: 1 – інструмент; 2 – деталь

Зазор  $\delta$  між інструментом та деталлю повинен бути меншим за амплітуду коливань  $\xi$ . У процесі ППД інструмент періодично входить в поверхню деталі на глибину:

$$h = \xi - \delta - h_{np},$$

де  $h_{np}$  – пружне відтиснення деталі.

Після входження інструмент відокремлюється від оброблюваної поверхні деталі. На поверхню діє тільки динамічне навантаження. Цей метод дозволяє обробляти також нежорсткі та деталі з переривчастими поверхнями, не дає напливів та завалів на торцях деталі. При пошуках у літературних джерелах не знайдено подібних схеми ППД. Для визначення умов, при яких проходить ППД, необхідне проведення теоретичних та експериментальних досліджень взаємодії інструмента у контакті з деталлю в процесі

ультразвукового вигладжування. Для виконання досліджень розроблено стенд зображений на рисунку 2.31, на базі токарно-гвинторізного верстата 16Б05АФ10. Всі додаткові пристрої та інструмент кріпляться до різцетримач верстата.

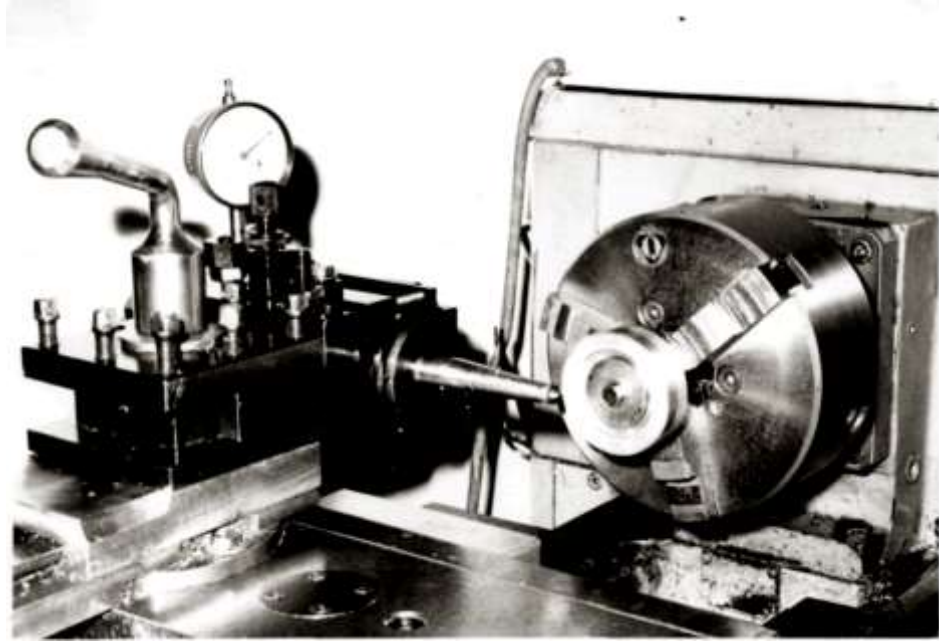


Рисунок 2.31.- Загальний вигляд 16Б05АФ10 з обладнанням до вигладжування

Важливим елементом технологічного процесу ППД є призначення припусків на обробку. Більш важливо це при обробці поверхні точних деталей. За даними, розмір деталей після вигладжування може змінюватись до 3–5 мкм. Визначено, розмір деталі практично не зазнає змін при ультразвуковому вигладжуванні. Величина припуску для цієї операції пластичного деформування визначається за формулою:

$$\Delta D = b \cdot R_{авих} ,$$

де  $\Delta D$  – припуск діаметру заготовки, мкм;  $b$  – коефіцієнт, який залежить від матеріалу деталі (наприклад, для сталі 45  $b = 4,6$ );  $R_{авих}$  середнє арифметичне відхилення вихідного профілю поверхні, мкм.

Отримуємо, що ППД при вигладжуванні визначається наступною залежністю:

$$U = 0,05 \cdot P - 0,5,$$

де  $P$  – сила вигладжування.

Як бачимо з наведених залежностей у них не враховуються радіус інструменту, глибина впровадження інструмента в деталь, механічні характеристики матеріалу деталі. Виходячи з цього, для вивчення зміни розмірів деталей під впливом режимів обробки проведено ряд дослідів. Досліди виконувались за допомогою зразків із сталей 10 (100 HB), 45 (150 HB, 50 HRC), ШХ15 (210 HB, 55 HRC), алюмінієвих сплавів Д16Т (120 HB), В95 (190 HB). ППД вигладжуванням проводилось інструментом що має наконечник із твердого сплаву ВК15 із радіусом сфери 1, 2, 4 і 6 мм. Виміряли розміри деталей до та після обробки за допомогою вимірювальної машини фірми «Оліветі», та використовуючи важільну скобу що має ціну поділки 1 мкм. Експериментальні залежності зміни діаметру оброблювальної деталі від глибини входження наконечника інструменту при обробці алюмінієвих сплавів показані на рисунку 2.32.

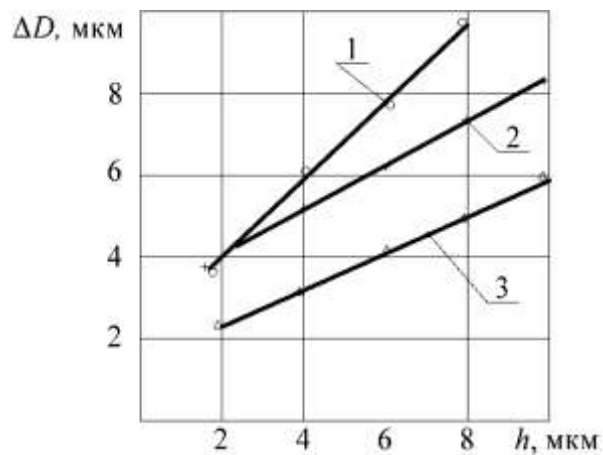


Рисунок 2.32.- Залежність діаметру деталі від глибини входження інструменту: 1 – Д16Т; 2 – В95; 3 – ПВ90

З наведених залежностей, ми бачимо, що зміна діаметра деталі безпосередньо залежить від твердості матеріалу оброблюваної деталі. Зміна менша при більшій твердості деталі. На зміну діаметра після обробки також суттєво впливає вихідна шорсткість оброблюваної поверхні що показано на рисунку 2.33.

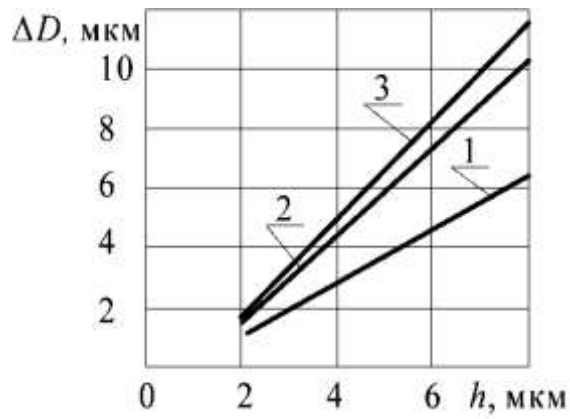


Рисунок 2.33.- Залежність зміни діаметра деталі під впливом глибини впровадження індентора: оброблюваний матеріал – Д16;  $\xi$  – 12 мкм; S – 0,01 мм/об; R – 2 мм; 1 – Ra 0,01; 2 – Ra 0,07; 3 – Ra 1,5

При не великих глибинах проникнення вплив на деталь зменшується, тому що відбувається зминання лише вершини мікронерівностей. Під час збільшення глибини проникнення інструменту більш високі вершини зминаються інтенсивніше, по причині виникнення у зоні контакту значних контактних тисків, що спричинене малою фактичною площею контакту інструменту та деталі. При усіх дослідженнях не залежно від матеріалів заготовки ці залежності мають однаковий характер. Зміна діаметра заготовки після обробки наконечниками що мають різні радіуси сфери показана на рисунку 2.34.

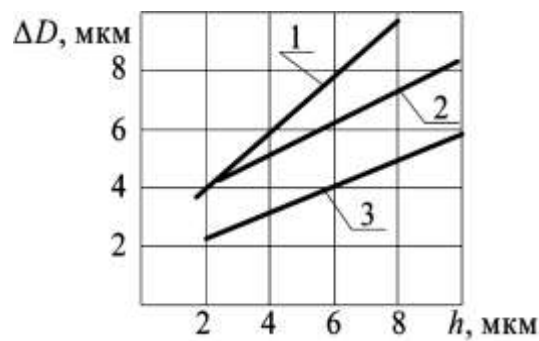


Рисунок 2.34.- Вплив радіуса сфери наконечника на зміну діаметра деталі:  $\xi$  – 12 мкм; S – 0,01 мм/об; V – 1,33 м/с; 1 – R = 2 мм; 2 – R = 4 мм; 3 – R = 6 мм

При ППД інструментом що має менший радіус сфери наконечника діаметр деталі зменшується значно більше ніж при обробленні інструментом що має більший радіус, але при однаковій глибині впровадження. Це можна

пояснити тим, що з деталлю пов'язані контактні тиски пов'язані що зв'язані з площею контакту самого інструмента. Це показує, що для інструмента що має менший радіус сфери наконечника площа контакту буде менша, а, відповідно, контактні тиски більшими ніж у випадку, коли інструмент з більшим радіусом робочої сфери.

Метод ППД вигладжування з попереднім зазором дозволяє нам реалізувати режим імпульсного деформування, що може забезпечити розрив контакту між інструментом та заготовкою безпосередньо в процесі обробки, що в свою чергу усуває захоплювання поверхні заготовки та інструменту. У роботі вивели залежність що дозволяє визначати пластичне деформування при застосуванні ультразвуковому вигладжування з попереднім зазором, що надає можливість чітко визначити розміри деталі після обробки. Також отримано залежність для розрахунку безпосередньо розмірів деталі.

## **2.10 Висновки розділу**

Розглянувши наведені у роботі методи поверхневого пластичного деформування ми маємо змогу обрати варіант який є найбільш оптимальним для деталей «Важіль» та задовольняє експлуатаційні вимоги.

Найбільш оптимальним методом приймаємо обкочування заготовки роликком, що забезпечує значне збільшення міцності і мікротвердості оброблених поверхонь, вони більш зносостійкі, ніж, наприклад, поверхні отримані за допомогою лез або абразивної обробки.

## РОЗДІЛ 3.

### 3.1 Глибина пластично деформованого шару. Напружено-деформований стан в осередку деформації

Під час розрахунку напружень заготовки початок координат знаходиться в центрі контакту між роликом і заготовкою, осі  $x$  і  $y$  співпадають з великою і малою осями симетрії відповідно еліптичної площадки, а з напрямом контактного навантаження силою  $P$  вісь співпадає вісь  $z$ . Результати розрахунків внутрішніх напружень розраховані для ролика що має наступні геометричні параметри:  $R11 = 27\text{мм}$ ,  $R21 = 7\text{мм}$ ,  $R12 = 25\text{мм}$  при глибині вдавлювання  $h = 0,014\text{мм}$  наведені на рисунку 3.1, при глибині вдавлювання  $h = 0,028\text{мм}$  наведені на рисунку 3.2, а при глибині вдавлювання  $h = 0,042\text{мм}$  ми бачимо на рисунку 3.3.

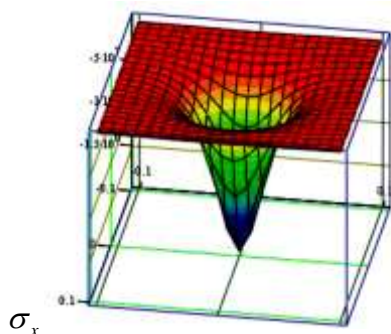
Аналогічні розрахунки виконаємо також для випадку коли має місце пластична деформації в зоні контакту. В роботі наведено формули за якими можна виконати розрахунок головних напружень  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  по осі  $z$ . Дані формули отримано за умови, що  $p = p_{сер} = \text{const}$ , але радіус вм'ятини:  $r \neq \text{const}$ .

$$\sigma_x = \frac{2}{\pi} \cdot P_{сер} \cdot \int_0^{\pi/2} \left\{ \left[ 2(1-2\mu) \cdot \ln \frac{L+1}{2L} + 2(2-\mu)L - L^3 \right] \cdot \sin^2(\varphi) - (1-2\mu)(L + \ln \frac{L+1}{2L}) \right\} d\varphi - \frac{1+2\mu}{2} P_{сер},$$

$$\sigma_y = \frac{2}{\pi} \cdot P_{сер} \cdot \int_0^{\pi/2} \left\{ \left[ 2(1-2\mu) \cdot \ln \frac{L+1}{2L} + 2(2-\mu)L - L^3 \right] \cdot \sin^2(\varphi) - (1-2\mu)(L + \ln \frac{L+1}{2L}) \right\} d\varphi - \frac{1+2\mu}{2} P_{сер},$$

$$\sigma_z = \frac{2}{\pi} \cdot P_{сер} \cdot \int_0^{\pi/2} L^3 d\varphi - P_{сер}$$

де  $L = \frac{z}{b} \left( \frac{1}{1-e^2 \sin^2 \varphi} - \frac{z^2}{b^2} \right)^{\frac{1}{2}}$ ,  $e = \sqrt{1 - \left( \frac{b}{a} \right)^2}$  - ексцентриситет контуру еліптичної площадки, по поверхні якої розподілений тиск  $p$ .





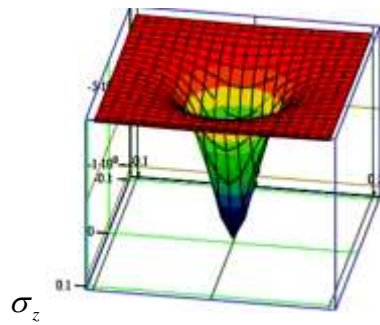
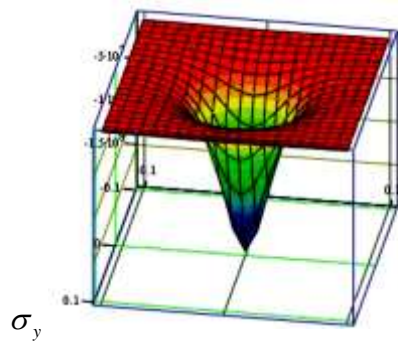


Рисунок 3.1 – Розподіл  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  за умови контакту ролика при глибині вдавлювання  $h = 0,014\text{мм}$

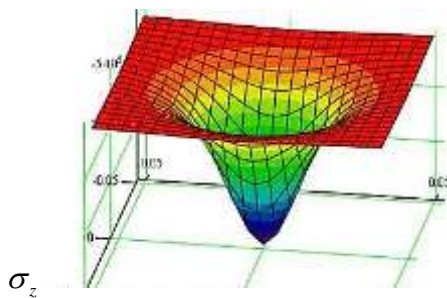
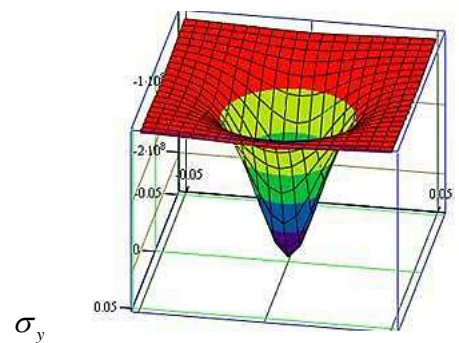
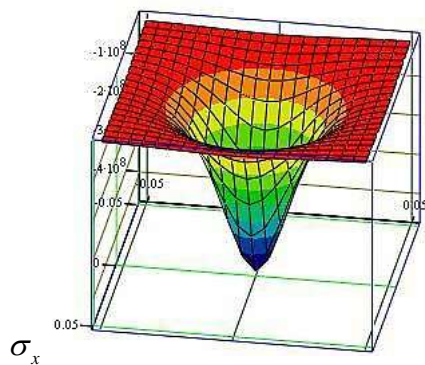


Рисунок 3.2 – Розподіл  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  за умови контакту ролика при глибині вдавлювання  $h = 0,028\text{мм}$

Проаналізувавши отримані результати можна визначити, що на осі  $z$ , яка проходить через центр вм'ятини мають місце найбільші значення напружень. За цих умов напруження зростають поступово залежно від зростанням

глибини вдавлювання інструменту. Таким чином, отримуємо нормальні напруження в центрі вм'ятини, що в свою чергу дорівнюють  $\sigma_z = -193\text{МПа}$  при  $h = 0,014\text{мм}$  і  $\sigma_z = -2140\text{МПа}$  при  $h = 0,042\text{мм}$ ;  $\sigma_y = -104\text{МПа}$  при  $h = 0,014\text{мм}$  і  $\sigma_y = -1153\text{МПа}$  при  $h = 0,042\text{мм}$ ;  $\sigma_x = 98\text{МПа}$  при  $h = 0,014\text{мм}$  і  $\sigma_x = -314\text{МПа}$  при  $h = 0,042\text{мм}$ .

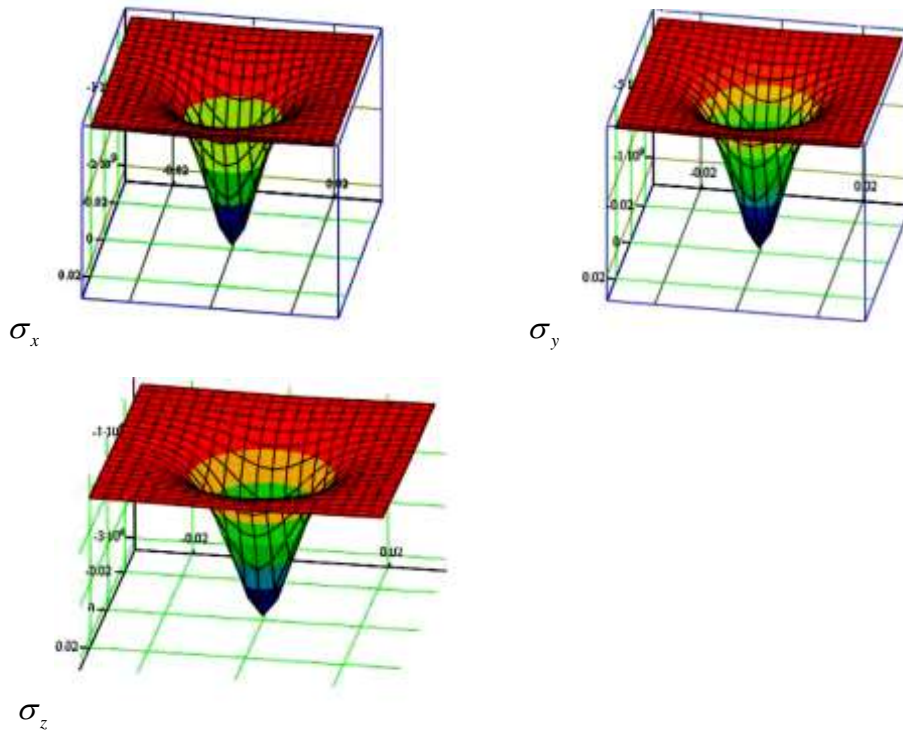


Рисунок 3.3 – Розподіл  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  за умови контакту ролика при глибині вдавлювання  $h = 0,042\text{мм}$

Виходячи з умов, що на границі пружної і пластичної областей ( $S \approx h$ ) можна вирахувати глибину поширення пластичної деформації  $S \approx h$ :

$$\sigma_T = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2}$$

Наведену вище систему рівнянь за умови  $\frac{b}{a} \geq 1$  можна спростити до одного рівняння:

$$\frac{\sigma_T}{P_{сер}} = \frac{\pi}{\frac{1}{4} \left[ 5 \left( \frac{b}{a} \right)^{\frac{3}{2}} + 3 \right] \left( \frac{h_b}{b} \right)^{2+0,2 \ln(b/a)} + \frac{17}{6 + \ln \frac{b}{a}}}$$

З минулої формули ми отримуємо наступну залежність для визначення  $h_s$

$$h_s = b \left[ \frac{4}{5 \left( \frac{b}{a} \right)^{3/2} + 3} \left( \frac{P}{a \cdot b \cdot \sigma_T} - \frac{17}{6 + \ln \frac{b}{a}} \right) \right]^{\frac{5}{10 + \ln \frac{b}{a}}}$$

Формула дійсна для випадків коли  $0,1 \leq \frac{\sigma_T}{P_{nad}} \leq 0,5$ , а відносна похибка розрахунків  $h_s$  по даній формулі повинна не перевищувати 3-5%. На границі вказаного інтервалу ми отримаємо максимальне значення напруження.

За умови що  $\frac{b}{a} = 1$ , або контур вм'ятини обмежений колом що має діаметр  $d$ , формулу можна спростити до наступного вигляду:

$$h_s = \sqrt{\frac{P}{2 \cdot \sigma_T} - 1,42 \left( \frac{d}{2} \right)^2}$$

Дану формулу, можна використовувати для розрахунків  $h_s$  за умови  $\frac{b}{a} \geq 0,6$ , при цьому маючи малу похибку, але  $d = d_{id} = 2\sqrt{a \cdot b}$

З вище наведених формул ми отримали розподіл напружень в залежності від глибини відбитку та  $z$  (рисунок 3.4).

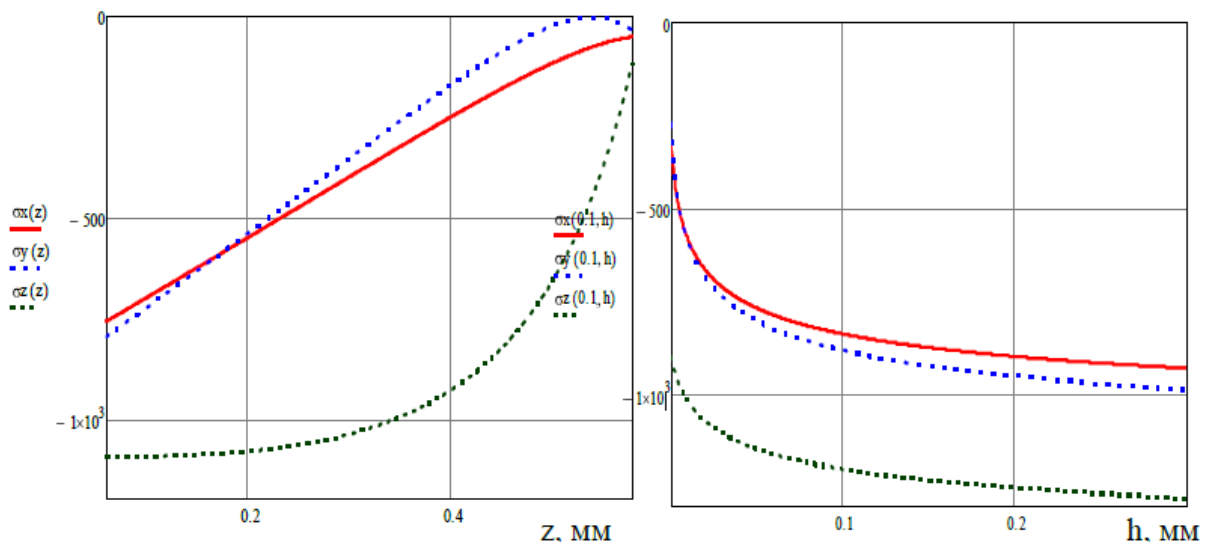


Рисунок 3.4 – Залежність глибини вдавлювання ролика  $h$  та напружень на відстані від поверхні  $z$

Проаналізувавши отримані дані ми можемо зробити наступні висновки:

- Занижені значення інтенсивності напружень отримуються при

математичному моделюванні, що пов'язано з прийнятих припущень при точних розрахунка;

- вершина хвилі, є найбільш небезпечним, по причині можливості руйнування поверхневого шару при вершині. Це небезпечно тим, що зазвичай візуально може бути не помічений дефект, оскільки ролик при обкочуванні частково закатає(тим самим «маскуючи») дефекти, що проявляються при експлуатації обробленої деталі.

- із збільшенням відношень осей еліпса  $a$  до  $b$  зростає також нерівномірність розподілу напружено-деформованого стану безпосередньо у поверхневому шарі деталі.

### **3.2 Математичне моделювання процесу обкочування заготовки роликом**

ППД можна застосовувати для обробки різноманітних поверхонь: плоских поверхонь колінчастих і шліцьових валів, різьб, циліндричних, зубчастих коліс, тощо.

Для виконання розрахунку усіх параметрів напружено-деформованого стану поверхневого шару заготовки що оброблюється в процесі обкочування роликом за допомогою методу скінчених елементів ми вивчили розробки, що були у вільному використанні, але вони не надавали заданої точності.

Значні деформації відбуваються у зоні пластичної хвилі за умови несприятливої схеми напруженого стану. При цьому показник напруженого стану  $\eta$  змінюється у зоні хвилі від  $\eta=0,71$  до  $\eta=1,6$ , а параметр Надаї - Лоде може змінюватись від  $\eta_a = -0,3$  до  $\eta_a = -0,4$ .

Основні деформації можна спостерігати в зоні контакту інструменту та деталі, проте зміна використаного ресурсу пластичності на предмет збільшення незначна. В області безпосереднього контакту маємо показники  $\eta=-0,75 \dots -0,7$ ,  $\eta_a = 0,2 \dots 0,3$ , з чого можна зробити висновок, що має місце схема всебічного стиснення заготовки. При переході частки матеріалу в

другу зону з першої під дією інтенсивних деформацій за умови впливу гідростатичним стиском можливо усунути деяких з утворених дефектів.

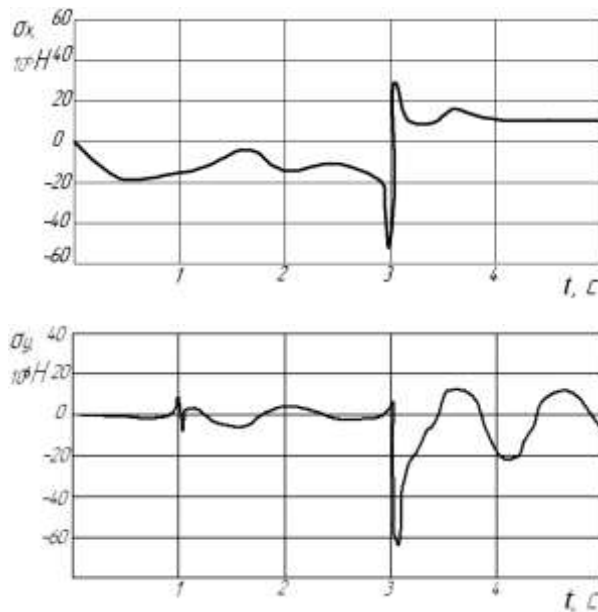


Рисунок 3.1.- Нормальні поверхневі напруження

У роботі ми визначили, що незворотна пошкодженість металу поверхневого шару заготовки під час оброблення обкачуванням може відбуватись частіше, в зоні пластичної хвилі, але найбільше в її вершині.

### 3.3 Висновки до розділу

1. Виконано чисельне моделювання процесу деформування поверхневого шару матеріалу деталей при обкочуванні роликком, в результаті якого встановлено напружено-деформований стан матеріалу в залежності від параметрів обкочування.
2. Визначено напружено-деформований стан в осередку деформації при вдавлюванні тороїдального ролика з довільною кривизною робочої поверхні вповерхню довільної кривизни.

## РОЗДІЛ 4

### 4.1 Розроблювання стартап – проекту

Таблиця 4.1 - Загальні відомості

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Розробка методу поверхневого пластичного деформування з підвищеною екологічністю	Фінішне оброблення деталей Токарний верстат Токарно-гвинторізний верстат	Менша вартість за стандартні методи з абразивними інструментами  Екологічніше більшості статичних методів ППД  Дешевше для багатосерійного виробництва

Таблиця 4.2 - Визначення позитивних, негативних чи нейтральних сторін

№	Техніко-економічні характеристики	Конкуренти				Слабка сторона	Нейтральна сторона	Сильна сторона
		Мій проект	Конкурент №1	Конкурент №2	Конкурент №3			
1	Вартість	+	-	-	+	-	-	+
2	Налагодження	-	-	-	+	-	+	-
3	Точність	+	-	-	-	-	-	+
4	Швидкість	+	+	+	-	-	-	+
5	Економія	+	-	-	-	-	-	+
6	Попит	-	+	+	-	+	-	-

## 4.2 Технологічність проекту

Таблиця 4.3 - Технологічна здійсненність проекту

№	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1	Створення інструменту	Токарний верстат	+	+
2	Фінішне оброблення	Токарний верстат ЧПУ	+	+
4	Патентування	Сертифікаційний центр	+	-
5	Спроба реалізації	Маркетинговий відділ	+	-
6	Масове виробництво	Токарний верстат	+	-

## 4.3 Аналіз попиту продукту

Таблиця 4.4 - Характеристика ринку

№	Показники ринку	Характеристика
1	Кількість головних гравців	Зод.
2	Загальний обсяг продаж	250000грн
3	Динаміка ринку	зростає
4	Наявність обмежень для входу	Конкуренція, мала обізнаність споживачів, новий метод.
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Паспортні дані, сертифікація, контрольні виміри, якість.
6	Середня норма рентабельності в галузі	100%

Таблиця 4.5 - Потенційні споживачі товару

№	Попит, що потребує ринок	Клієнтська база	Відмінності у поведінці споживачів	Вимоги до товару
1	Фінішне оброблення	Підприємства з серійним чи велико серійним виробництвом	Види верстатів Токарні Токарно-фрезерні Токарно-гвинторізнi	Подача заготовок у робочу зону
2	Точність деталей	Підприємства з серійним чи велико серійним виробництвом	Види верстатів Токарні Токарно-фрезерні Токарно-гвинторізнi	Збереження положення заготовок під час фіксації
3	Ергономічність	Підприємства з серійним чи велико серійним виробництвом	Види верстатів Токарні Токарно-фрезерні Токарно-гвинторізнi	Зменшення кількості робочого місця

Таблиця 4.6 - Загрози ринку збуту

№	Фактор	Зміст	Реакція
1	Необізнаність споживача	Новий продукт зазвичай викликає негативну реакцію	Відмова у споживанні товару
2	Новий метод	Клієнти звикли до стандартних робочих методів	Закупівля конкурентів



3	Малокваліфіковані робітники	Через не компетентність оператори можуть відмовляти у користуванні	Використання вже вивчених операцій
---	-----------------------------	--	------------------------------------

Таблиця 4.7 - Можливості впровадження

№	Можливість	Зміст	Реакція
1	Реклама	Застосування методів пізнання методу	Зацікавленість
2	Конкурентна ціна	Метод набагато більш дешевий за конкурентів	Спроможність купівлі
3	Попередня освіта	Вивчення операторів та керівництво керуванням методом	Попит буде створювати пропозицію

Таблиця 4.8 - Ступеневий аналіз ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства
1. Вказати тип конкуренції	Монополія	Новизна проекту Значна різниця вартості
2. За рівнем конкурентної боротьби	Масова	Задіяти логістичні компанії
3. За галузевою ознакою	внутрішньогалузева	-
4. Конкуренція за видами товарів	Товарно-видова	Компактність пристрою
5. За характером конкурентних переваг	Цінова	Дешева вартість
6. За інтенсивністю	марочна	-

Таблиця 4.9 - Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Складові аналізу	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари замітники
	SANDVIK DI Ceratizit	3	5	1500	Ручна подача
Висновки	Щільна боротьба	Мала спроможність	Не досить багато факторів, бо принцип дії доволі різний	Спроможність окупити пруткову подачу не завжди є у всіх	Є свої плюси та мінуси за даних методів

Таблиця 4.10 - Фактор конкуренції

№	Фактор	Обґрунтування
1	Вартість	Ціна пристрою значно менша за пристрій пруткової подачі
2	Точність	На деяких фіксаторах тільки новий пристрій забезпечує достатню точність
3	Економічність	За роботи нового методу використовується максимальна кількість матеріалу
4	Ергономічність	За новою технологією робоча зона значно зменшується

Таблиця 4.11 - Порівняння сильних і слабких сторін нового методу ППД

№	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг конкурентів						
			-3	-2	-1	0	1	2	3
1	Вартість	20	S	D	C				
2	Точність	18		C	S	D			
3	Економічність	20	D	S		C			
4	Ергономічність	10			S	D	C		

Таблиця 4.12 - SWOT аналіз

Сильні сторони: Ціна Економічність Точність	Слабкі сторони: Якість Довіра Кваліфікація
Можливості: Маркетинг Освіта Реклама	Загрози: Мала обізнаність Довіра до конкурентів Неприйняття ринком

Таблиця 4.13 - Альтернатива впровадження

№	Альтернатива поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1	Логістична	Підписання договорів на реалізацію	Від місяця до півроку
2	Рекламна	Вкладання грошей у реалізацію	Від півроку до року
3	Освітня	Розповсюдження інформації	Від місяця до двох років

#### 4.4 Розроблення ринкової стратегії

Таблиця 4.14 - Вибір цільової аудиторії

№	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1	Малі підприємства Один верстат	мала	70%	мала	80%
2	Середні підприємства 4-5 верстат	мала	50%	мала	50%

3	Великі підприємства	середня	30%	велика	40%
Які цільові групи обрано: 1,2,3					

Таблиця 4.15 - Стратегії ринку

№	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкуренти	Базова стратегія
1	Логістична	Надання на реалізацію маркетинговим компаніям	SANDVIK DI Ceratizit	Лідерства на витратах
2	Рекламна	Постійне присутність на слуху продукта	SANDVIK	Спеціалізації
3	Освітня	Попит створюють самі робітники	SANDVIK Ceratizit	Диференціації

Таблиця 4.16 - Стратегія конкурентної поведінки

№	Чи проект першопроходець?	Цільова аудиторія нова чи вже існуюча?	Чи копіює основні характеристики компанія	Стратегія конкурентної поведінки
1	Логістична	+	+	Більша моржа для реалізаторів

2	Рекламна	-	-	Впровадження власної реклами
3	Освітня	+	-	Задіяння чорної слави нашого продукту

Таблиця 4.17 - Вибір стратегії позиціонування

№	Вимоги аудиторії до товару	Базова стратегія	Ключові конкурентні позиції
1	Мала вартість	Лідерства на витратах	Найдешевша ціна
2	Достатня точність	Спеціалізації	Найкраща точність на усіх видах патронів
3	Простота	Диференціації	Зручність використання

#### 4.5 Розроблення маркетингової програми

Таблиця 4.18 - Ключові переваги

№	Потреба	Вигода	Переваги над конкурентами
1	Точність	Велика точність	Точність на усіх видах деталей
2	Вартість	Дешеве виробництво	Деякі позиції дорожчі на 1000%
3	Ергономічність	Робота у самому верстаті Просте налагодження Безпечність	Менша робоча площа Не потрібно додатково слідкувати за пристроєм Не має загрози

4	Економічність	Збереження інструменту та його повне використання	Не потрібно додаткових обробок Малі похибки
---	---------------	---	--

Таблиця 4.19 - Моделі товару

Рівні товару	Сутність	
Товар за задумом	Інструмент ППД для усіх видів патронів	
Товар у реальному виконанні	Властивості	Характеристика
	Сила затиску	До 2000Н
Якість: Експериментальні сертифіковані дослідження		
	Марка : КБ «ім. М. Шкляренка»	
	До продажу	
Товар із підкріпленням		
Буде запатентовано у сертифікаційному центрі		

Таблиця 4.20 - Рівень цін

Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Межі встановленої ціни
4000	250000	900000	3000-15000

Таблиця 4.21 - Формування системи збуту

Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту товару	Величина аудиторії	Оптимальна система збуту

Зазвичай потрібні інструменти заковують вже у своїх постачальників	Пошук нових клієнтів Постійно розкручувати товар	Усі підприємства з верстатами токарного типу ЧПУ	Логістична
---	--	--	------------

Таблиця 5.21 - Концепція маркетингових комунікацій

Поведінка клієнтів	Канали комунікації	Ключові позиції	Рекламна поведінка	Концепція рекламного звернення
Потреба у автоматизації виробництва	Інтернет Телефон Виставки	Точність Вартість Простота	Лідерства на витратах	ППД та економія

Макет розробки стартап-проекту був взятий на сайті кафедри технологій машинобудування НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського»[10]

## 4.8 Висновки

У розробці стартапу ми зрозуміли, що пристрій має великі переваги над існуючими методами поверхневого пластичного деформування. За макетом «Лідерства на витратах» на мою думку, проект зможе реалізуватись на ринку через свої переваги у ціні, точності, економності. Якщо за такого макету проект не буде виходити з великим попитом на ринок, можливо потрібно застосувати тип «Диференціації» за яким цільову аудиторію, буду поступово привчати до такого типу фінішного оброблення.

## **ВИСНОВКИ**

У даній роботі досягнуто результату зменшення матеріало- та енергоємності виробів, що безпосередньо впливає на їх економічність і конкурентоспроможність.

У порівнянні з фінішними операціями оброблення з використанням абразивного інструменту та примусового охолодження зони різання кращими з точки зору екології представляються процеси поверхневого пластичного деформування (ППД), зокрема спосіб обкочування заготовки роликком.

Оброблення методами поверхневого пластичного деформування (ППД) полягає в силовому контактному впливі деформуючого інструмента на поверхню заготовки в умовах їх відносного руху і для нашої деталі «Важіль» ми отримали оптимальні показники шорсткості та міцності поверхонь.

У даній роботі було проведено порівняльний аналіз існуючих методів поверхневого пластичного деформування та обраний найкращий з методів для технологічного забезпечення зміцнення поверхневого шару деталей машин.



## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Андрианов А. Ю., Черников А. П., Щедрин А. В., Прилепин М. М., Алешина С.В., Павлов А. М. Технологические возможности перспективных методов комбинированной деформирующе-режущей обработки СТИН. — 2003. — № 3. — С.
2. Полюдов О. М. Механіка поліграфічних і пакувальних машин. Видво УАД, 2005 — 180 с.
3. Пшибыльский М. Технология поверхностной пластической обработки. — М.: Металлургия, 1991. — 479 с.
4. Упрочнение поверхностей деталей комбинированными способами / А. Г. Бойцов, В. Н. Машков, В. А. Смоленцев, Л. А. Хворостухин. — М.: Машиностроение, 1991. — 144 с.
5. Хейфец М. Л. Проектирование процессов комбинированной обработки. — М.: Машиностроение, 2005. — 272 с.
6. Хмілярчук О. І. Пристрої та інструмент для виконання віброобробки на деталях поліграфічного обладнання. Технологія і техніка друкарства. — 2006. — № 1—2(11 — 12). — С. 133—137.
7. Чехман Я. І. та ін. Друкарське устаткування: Підручник Я. І. Чехман, В. Т. Сенкус, В. П. Дідич, В. О. Босак. — Львів: УАД, 2005. — 468 с.
8. Шатуров Г. Ф., Мрочек Ж. А. Прогрессивные процессы механической обработки поверхностей. — Мн.: УП «Технопринт», 2001.— 460 с.
9. Шнейдер Ю. Г. Технология финишной обработки давлением: Справочник. — СПб.: Политехника, 1998. — 414 с.
10. Інтернет-ресурс кафедри технології машинобудування. Посилання: <http://tm-mm.kpi.ua/ru/ucება/%D0%B2%D1%8B%D0%BF%D0%BE%D0%BB%D0%BD%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5-%D0%BC%D0%B0%D0%B3%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%B5%D1%80%D1%81%D0%BA%D0%BE%D0%B>

[%D0%B4%D0%B8%D1%81%D1%81%D0%B5%D1%80%D1%82%D0%B0%D1%86%D0%B8%D0%B8.html](#)

11. Г. Д. Дель, *Технологическая механика*. Москва: Машиностроение, 1978.
12. О.В. Сердюк, Залежність твердості поверхневого шару деталі після обкочування роликом від технологічних параметрів процесу.  
Посилання:  
[https://scholar.google.ru/citations?user=F9i4wX0AAAAJ&hl=ru#d=gs\\_md\\_cita-d&u=%2Fcitations%3Fview\\_op%3Dview\\_citation%26hl%3Dru%26user%3DF9i4wX0AAAAJ%26citation\\_for\\_view%3DF9i4wX0AAAAJ%3AW7OEmFMy1HYC%26tzom%3D-120](https://scholar.google.ru/citations?user=F9i4wX0AAAAJ&hl=ru#d=gs_md_cita-d&u=%2Fcitations%3Fview_op%3Dview_citation%26hl%3Dru%26user%3DF9i4wX0AAAAJ%26citation_for_view%3DF9i4wX0AAAAJ%3AW7OEmFMy1HYC%26tzom%3D-120)
13. О.В. Сердюк, Напружено-деформований стан при багатопрохідній обробці обкочуванням роликом. Посилання:  
[https://scholar.google.ru/citations?user=F9i4wX0AAAAJ&hl=ru#d=gs\\_md\\_cita-d&u=%2Fcitations%3Fview\\_op%3Dview\\_citation%26hl%3Dru%26user%3DF9i4wX0AAAAJ%26citation\\_for\\_view%3DF9i4wX0AAAAJ%3AeQOLeE2rZwMC%26tzom%3D-120](https://scholar.google.ru/citations?user=F9i4wX0AAAAJ&hl=ru#d=gs_md_cita-d&u=%2Fcitations%3Fview_op%3Dview_citation%26hl%3Dru%26user%3DF9i4wX0AAAAJ%26citation_for_view%3DF9i4wX0AAAAJ%3AeQOLeE2rZwMC%26tzom%3D-120)
14. О.В. Сердюк, Вплив технологічних факторів на шорсткість поверхні після обкочування роликом із гвинтовою робочою поверхнею.  
Посилання:  
[https://scholar.google.ru/citations?user=F9i4wX0AAAAJ&hl=ru#d=gs\\_md\\_cita-d&u=%2Fcitations%3Fview\\_op%3Dview\\_citation%26hl%3Dru%26user%3DF9i4wX0AAAAJ%26citation\\_for\\_view%3DF9i4wX0AAAAJ%3AY0pCki6q\\_DkC%26tzom%3D-120](https://scholar.google.ru/citations?user=F9i4wX0AAAAJ&hl=ru#d=gs_md_cita-d&u=%2Fcitations%3Fview_op%3Dview_citation%26hl%3Dru%26user%3DF9i4wX0AAAAJ%26citation_for_view%3DF9i4wX0AAAAJ%3AY0pCki6q_DkC%26tzom%3D-120)
15. Зайдес С.А., НОВЫЕ СПОСОБЫ ПОВЕРХНОСТНОГО ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН;
16. В . В . Т у р и ч, ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ВИГЛАДЖУВАННЯ З УЛЬТРАЗВУКОМ;
17. С. А. Фирстов, С. Е. Шейкин\*, Ю. Н. Подрезов, Н. И. Даниленко, В. И. Даниленко, Н. Д. Рудык, Поверхностное упрочнение изделий сложной формы с использованием комплексных схем деформирования.